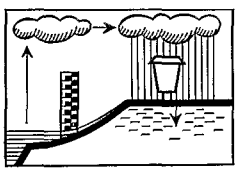
MANUEL D'HYDROMÉTRIE

tome IV

mesure des débits à partir des vitesses

M. ALDEGHERI
Directeur de Recherches de l'ORSTOM



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER

ORSTOM

ERRATUM

Page 1 : 2ème ligne du second paragraphe, il faut lire :
«il n'y a pas eu, jusqu'à cette dernière décennie, dans la plupart des pays du monde, ...».

Page 29 : 1ère ligne du paragraphe 1.4.3.1. :
au lieu de « < 3 m», lire « < 3 m/s» ;

dernière ligne :
au lieu de «être relevée à l'aire», lire «être relevée à l'aide».

Page 101 : Nomenclature 4 :
au lieu de «NECABOLIER», lire «MECABOLIER démontée».

Page 171 : avant formule (1)
au lieu de «Pa = d», lire «P = d» ;

formule (2)
au lieu de «$P = y - d (\sec - 1) (1 - K)$ »
lire «$P = [y - d (\sec \alpha - 1)] (1 - K)$».

Page 186 : 11ème ligne du paragraphe a) :
au lieu de «formule du moulinet par $N + n (T + t)$», lire «formule du moulinet par $N + n/(T + t)$».

Page 222 : 3ème ligne :
au lieu de «déjà cité page 72», lire «déjà cité page 108».

Le tableau V ci-après est à insérer après la page 288.

Montage Hélice	TECHNOLOGIE DES MOULINETS A SIGNALISATION ELECTRIQUE						
	AXE FIXE		AXE MOBILE				
Dispositif de Signalisation	Mécanique	A commande magnétique	Mécanique	Mécanique	A commande magnétique	Mécanique	
Entraînement du Générateur de Signaux	Vis sans fin et roue dentée	Aimant permanent	direct par vis sans fin en bout d'arbre et roue dentée	indirect par aimant permanent en bout d'arbre vis sans fin et roue dentée	Aimant permanent	Direct	
Générateur de Signaux	Interrupteur mécanique à levier	Interrupteur étanche à lames souples (I L S)	Interrupteur mécanique à levier	Interrupteur mécanique à levier	Interrupteur étanche à lames souples (I L S)	Pastille isolante sur une partie de l'axe et balais souples	
Fréquence des Signaux	Réglable par changement vis sans fin et roue dentée 1, 2, 10, 20 tours/top.	Fixe 1 tour/top.	Réglable par changement vis sans fin et roue dentée et pontage des bornes de sortie 1, 2, 5, 10, 20 40 tours/top.	Réglable par changement vis sans fin et roue dentée et pontage des bornes de sorti 1, 2, 5, 10, 20 40 tours/top.	Fixe 1 tour/top.	Fixe 1 tour/top.	
Types de Moulinets	OTT ARKANSAS type V (10050) (n'est plus construit)	OTT C 31 type 10002 NEYRFLUX type 2142	DUMAS NEYRPIC type 2113 (n'est plus construit)	DUMAS NEYRPIC MAGNETIQUE type 2113	DUMAS NEYRPIC type 2114 OTT C 2 type 10152	OTT C 1 type 10150	

TABLEAU V

INITIATIONS – DOCUMENTATIONS TECHNIQUES
N° 41

MANUEL D'HYDROMÉTRIE

Tome IV

MESURE DES DÉBITS A PARTIR DES VITESSES

M. ALDEGHERI
Directeur de Recherches de l'ORSTOM

O.R.S.T.O.M. – PARIS – 1979

.....

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, «que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à «une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple «et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement «de l'auteur ou des ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).
« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une «contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal».

.....

I.S.B.N. 2-7099-0546-9

© O.R.S.T.O.M. 1979

AVERTISSEMENT

C'est à la fin de l'année 1974, que le Comité Technique d'Hydrologie de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer lançait l'idée d'un Manuel d'Hydrométrie qui serait édité par fascicules, au fur et à mesure de leur élaboration.

Dans l'esprit des membres de ce Comité, il s'agissait d'utiliser les compétences et l'expérience des chercheurs et techniciens du Service Hydrologique de l'ORSTOM pour réaliser un manuel de langue française, plus orienté vers la pratique de la mesure que vers sa théorie.

Il a semblé naturel de publier ce Manuel d'Hydrométrie dans la série Initiation et Documentation Technique de l'ORSTOM et 7 tomes sont prévus, à savoir :

Tome 1 : Généralités sur la mesure hydrométrique. Eléments de base pour la pratique des travaux de terrain et de bureau.

.. Mesures et travaux topographiques.

Tome 2 : Mesures des précipitations - Mesures climatologiques.

Tome 3 : Limnimétrie.

Tome 4 : Mesure des débits par les vitesses.

Tome 5 : Méthodes globales de mesure des débits.

Tome 6 : Etalonnage et calculs des débits - Mesures de qualité des eaux et du transport en suspension.

Tome 7 : Règles pratiques de gestion des réseaux hydrométriques.

Techniques spéciales pour les bassins représentatifs et expérimentaux.

On pourra s'étonner que le premier tome à paraître soit le numéro quatre. Il faut rappeler que les différents tomes sont rédigés par des hydrologues engagés dans de nombreux programmes de recherche, tant au Bureau Central Hydrologique à Paris, que dans les Centres et Missions de l'ORSTOM Outre-Mer. Cette dispersion des auteurs et les impératifs de leurs programmes de travail font qu'il n'est pas possible de respecter l'ordre logique de publication.

SOMMAIRE

	Pages
I. ASPECT THEORIQUE DES MESURES DE DEBIT A PARTIR DE LA MESURE DES VITESSES	3
I.1. Définitions	3
I.1 1. Débit	3
I.1 2. Courbe d'étalonnage	3
I.2. Théorie de la mesure des débits par la mesure des vitesses	7
I.2 1. Généralités	7
I.2 2. Sur quelques considérations pratiques	11
I.3. Les différentes méthodes de mesure	14
I.3 1. Classification suivant les modalités de mesure de la vitesse sur chaque verticale	15
I.3 2. Classification suivant la répartition des verticales en fonction de la rapidité des variations du plan d'eau	24
I.4. Les différents modes opératoires	27
I.4 1. Mesures à gué	27
I.4 2. Mesures à partir d'un pont ou passerelle	28
I.4 3. Mesures à l'aide d'un bateau	28
I.4 4. Mesures à partir de transporteurs aériens	30
II. MATERIEL UTILISE POUR LA MESURE DES VITESSES	31
II.1. Détection de la vitesse	31
II.1 1. Aperçu des divers appareils utilisés pour la mesure de la vitesse d'un fluide	31
II.1 2. Les moulinets à hélice	39
II.1 3. Les dispositifs de détection du signal	68
II.1 4. Autres appareillages modernes pour la détection des vitesses	79
II.2. Les supports de moulinets	86
II.2 1. Montage sur perche	86
II.2 2. Montage sur saumon	90
II.3. Déplacements du support de moulinet	93
II.3 1. Déplacements verticaux	93
II.3 2. Déplacements horizontaux	99
II.4. Matériel divers	117
II.4 1. Définition de la section	117
II.4 2. Mesure des angles	125
II.4 3. Câble de retenue et câble amont	129
II.4 4. Autres accessoires	131
II.5. Documentation et fichier du matériel	132

III. OPERATIONS SUR LE TERRAIN 135

III.1. Généralités 135

III.2. Règles générales valables pour toutes les méthodes 138
III.2 1. Entretien du matériel 138
III.2 2. Choix de la section de mesure - 145
III.2 3. Choix du mode opératoire 151
III.2 4. Choix du matériel 151
III.2 5. Le carnet de jaugeage 157
III.2 6. Mesure des distances horizontales 164
III.2 7. Mesure de la profondeur 165
III.2 8. Nombre de verticales 178

III.3. Règles particulières liées au mode opératoire 182

III.3 1. Consignes liées aux méthodes 182
III.3 2. Règles liées au mode opératoire 190

IV. TRAVAUX DE BUREAU 241

IV.1. Remarques préliminaires 241

IV.2. Préparation des feuilles de jaugeage 243
IV.2 1. Calcul des vitesses à partir des relevés 244
IV.2 2. Corrections à apporter au dépouillement 246

IV.3. Dépouillement du jaugeage par la méthode point par point 248
IV.3 1. Méthode graphique 248
IV. 3 2. Méthodes arithmétiques 257

IV.4. Dépouillement du jaugeage par intégration 260
IV.4 1. Méthode graphique 260
IV.4 2. Méthode arithmétique 261
IV.4 3. Cas où il n'a pas été possible d'estimer la vitesse au voisinage du fond 261

IV.5. Dépouillement du jaugeage continu ou par verticales indépendantes 262

IV.6. Dépouillement des jaugeages aux flotteurs 265
IV.6 1. Méthodologie 265
IV.6 2. Calcul de la vitesse moyenne en surface Vms 266
IV.6 3. Calcul du débit 269
IV.6 4. Cas des jaugeages aux flotteurs avec vitesses très faibles 271

CONCLUSION 273

BIBLIOGRAPHIE 275

ANNEXE 279

"Le problème de la mesure des débits constitue l'une des plus pénibles incertitudes scientifiques actuelles"

L. BARBILLON - 1909

Ecrite en 1909 à propos des mesures du débit des turbines, lors des essais de réception des usines hydro-électriques, cette phrase reste encore valable pour la mesure des débits sur les fleuves et les rivières. En 1976, alors qu'on sait de quoi est constitué le sol de la lune, on ne connaît qu'à peu près bien les débits de la Seine à Paris, d'une façon assez médiocre ceux des crues de la Garonne à Toulouse.... et l'ingénieur chargé de l'étude de la moindre retenue collinaire dans n'importe quelle région de France se rend très rapidement compte, en recherchant les données hydrologiques disponibles, de l'exactitude de ces quelques lignes.

A quoi cela tient-il ? A deux causes principales : d'abord, il n'y a pas eu, jusqu'à présent cette dernière décennie dans la plupart des problèmes graves posés par le manque d'eau : on constate d'ailleurs que plus un pays est pauvre en eau mieux il connaît le volume de ses ressources. La seconde, c'est la difficulté rencontrée pour la réalisation des mesures, particulièrement en crue, dans toutes les régions du globe et durant la mauvaise saison en zone tempérée. Paradoxalement, il semble que les débits des cours d'eau soient mieux connus dans les régions tropicales qu'en France par exemple. La raison me paraît évidente : il est plus agréable de faire "trempette" dans l'eau à 26° que dans l'eau à 3 ou 4°.

Le but du présent manuel est d'exposer en détails les différents modes opératoires et techniques utilisés pour la mesure des débits à partir de la mesure des vitesses, de donner ensuite la description des matériels utilisés et examiner enfin les méthodes de dépouillement et d'interprétation des résultats.

Avant d'entrer dans le sujet proprement dit, nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que nous ne donnons pas un catalogue des matériels existants ou ayant existé ! Nous ne parlerons que des appareils les plus couramment utilisés et nous nous étendrons plus particulièrement sur les matériels modernes dont l'utilisation rend la tâche des hydrométristes sinon plus facile, du moins beaucoup plus aisée.

D'autre part, nous n'avons pas l'intention de passer en revue toutes les méthodes de jaugeage employées avec plus ou moins de succès par les hydrologues des divers continents. Ces méthodes sont décrites avec suffisamment de détails dans les ouvrages d'hydrologie édités en diverses langues. Ce que nous voudrions, c'est donner quelques "recettes" pratiques, à partir de techniques ayant fait leurs preuves, de façon à ce qu'elles soient adoptées de manière courante par les hydrométristes de l'ORSTOM et peut être par d'autres.

Mais ne soyons pas trop ambitieux et n'oublions pas que chacun est persuadé avoir découvert "la meilleure" méthode. Souhaitons simplement que ce tome 4 du manuel apporte quelques idées au hydrométristes aux prises avec des fleuves capricieux et leur permette de réaliser leurs mesures dans les conditions les plus favorables.

I. ASPECT THÉORIQUE DES MESURES DE DÉBIT A PARTIR DE LA MESURE DES VITESSES

I. 1. DÉFINITIONS

I. 1. 1. DÉBIT

Le débit est le volume d'eau traversant une section du cours d'eau pendant une unité de temps. On l'exprime soit en mètres cubes par seconde (m3/s) pour les débits importants, soit en litres par seconde (1/s) pour les faibles débits.

On a convenu d'écrire le résultat des mesures sur le terrain avec trois chiffres significatifs quelle que soit la valeur du débit :

. de 0 à 1 m3/s	: trois chiffres après la virgule	0,457 m3/s
. de 1 à 10 m3/s	: deux chiffres après la virgule	4,57 m3/s
. de 10 à 100 m3/s	: un chiffre après la virgule	45,7 m3/s
. de 100 à 1000 m3/s	: valeur entière	457 m3/s
. au-dessus de 1000m3/s	: arrondi à la dizaine de m3/s	4570 m3/s

Cette règle, qui pourrait s'intituler "règle des trois chiffres significatifs", se justifie aisément compte tenu de la précision que l'on peut espérer atteindre dans les conditions normales de mesure sur le terrain.

1. 1. 2. COURBE D'ÉTALONNAGE

On trouvera dans le tome 3 de ce manuel, les directives pour l'installation des stations hydrométriques destinées à la collecte de l'information hauteurs d'eau au droit d'une section correctement choisie d'un fleuve ou d'une rivière.

Les mesures de débit apportent une information complémentaire permettant de définir le régime du cours d'eau étudié. En effet, à partir de ces mesures, il est possible d'établir la relation hauteur-débit dans la section considérée. Cette relation est présentée le plus souvent sous forme de courbe d'étalonnage ou courbe de tarage.

Pour obtenir la meilleure définition de cette courbe, il est nécessaire de réaliser des mesures à différents niveaux du plan d'eau depuis l'étiage jusqu'aux plus fortes crues. En général, lorsque la section de contrôle des hauteurs d'eau est bien choisie, la relation hauteur-débit est constante dans le temps : on dit que cette relation est univoque.

Rappelons que :

= *dix ou mieux quinze jaugeages bien répartis sur toute l'amplitude de variation de cote à l'échelle, sont nécessaires pour tracer la courbe de tarage,*

= *des jaugeages de contrôle doivent être réalisés à intervalles réguliers pour déceler les détarages éventuels,*

= *le tracé de la courbe est d'autant plus précis que les variations de cote à l'échelle sont faibles pendant la durée des mesures,*

= *il existe toujours une certaine dispersion entre les points expérimentaux due aux erreurs inévitables de mesure. Le tracé est effectué en laissant, autant que possible, un nombre égal de points de part et d'autre de la courbe moyenne.*

Tout ceci sera précisé avec plus de détails dans le tome 6 consacré notamment à l'étalonnage et au calcul des débits.

Nous donnons à titre d'exemple deux courbes d'étalonnage :

- Figure 1, une rivière française, la Lèze à Lézat : bonne définition des points, dispersion faible, présence de deux contrôles aval,

- Figure 2, une rivière malgache, Isinko à Ambodiroka : crues rapides, mauvaise définition des points à partir de 1,20 m à l'échelle.

LEZE à LEZAT

Courbe d'étalonnage

Fig. 1

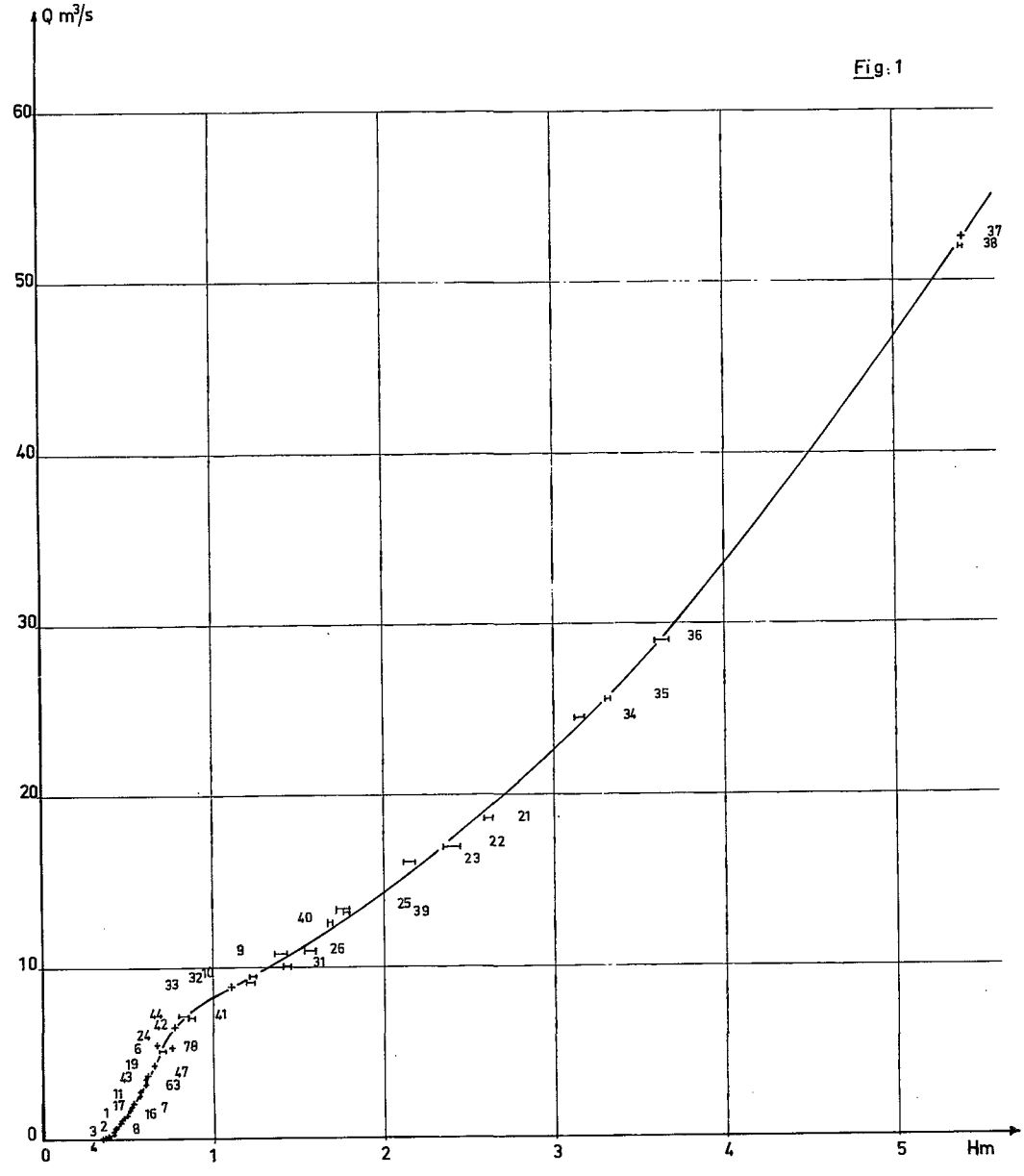
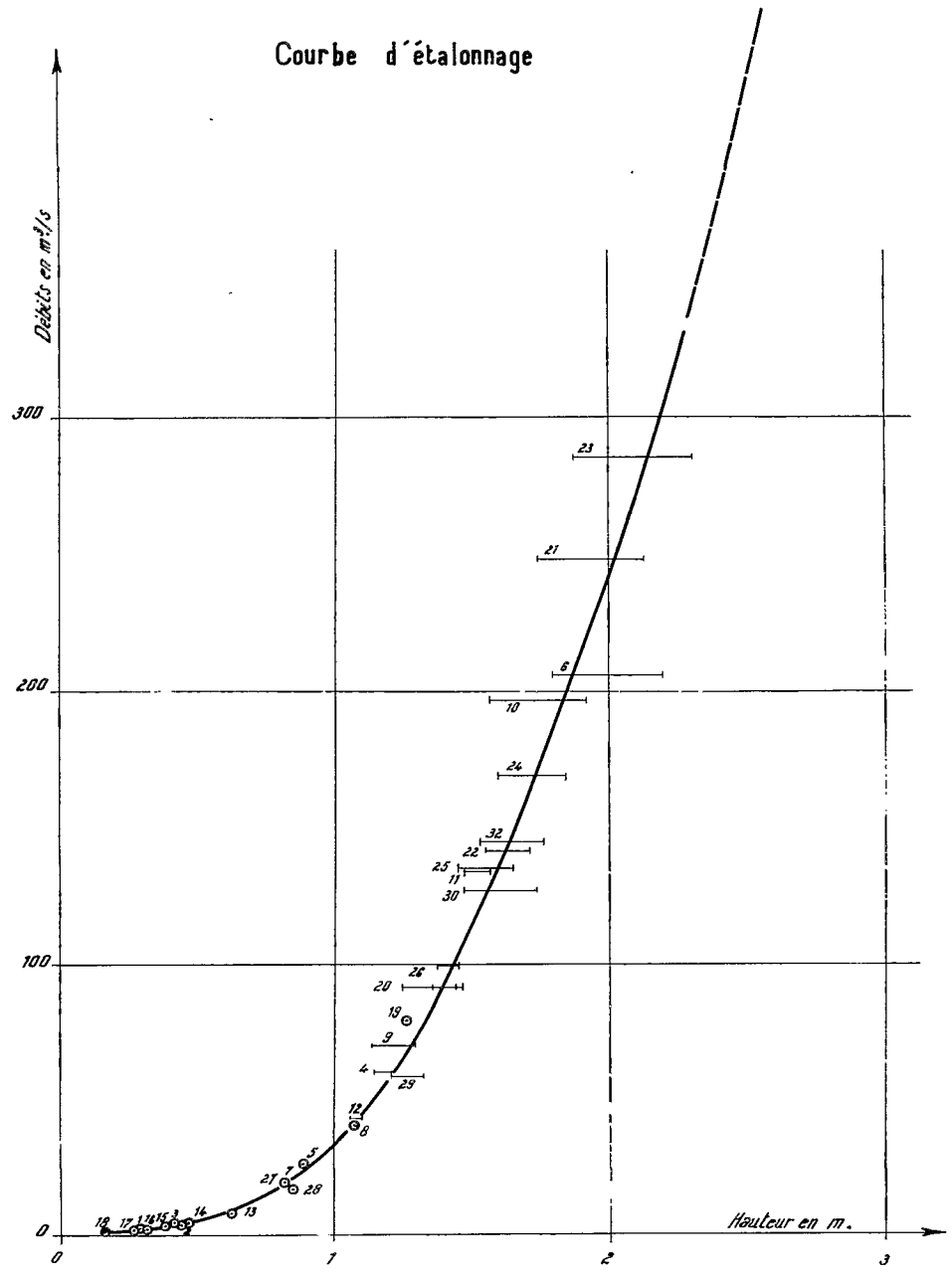


Fig. 2



ORSTOM | Ao | DATE : 10-X-MCMLXXII | DESSINÉ : | MAD 171 033

I. 2. THÉORIE DE LA MESURE DES DÉBITS PAR LA MESURE DES VITESSES

I. 2. 1. GÉNÉRALITÉS

D'après la définition donnée ci-dessus, le débit est donc égal au produit de la vitesse V du fluide par la surface S de la section traversée :

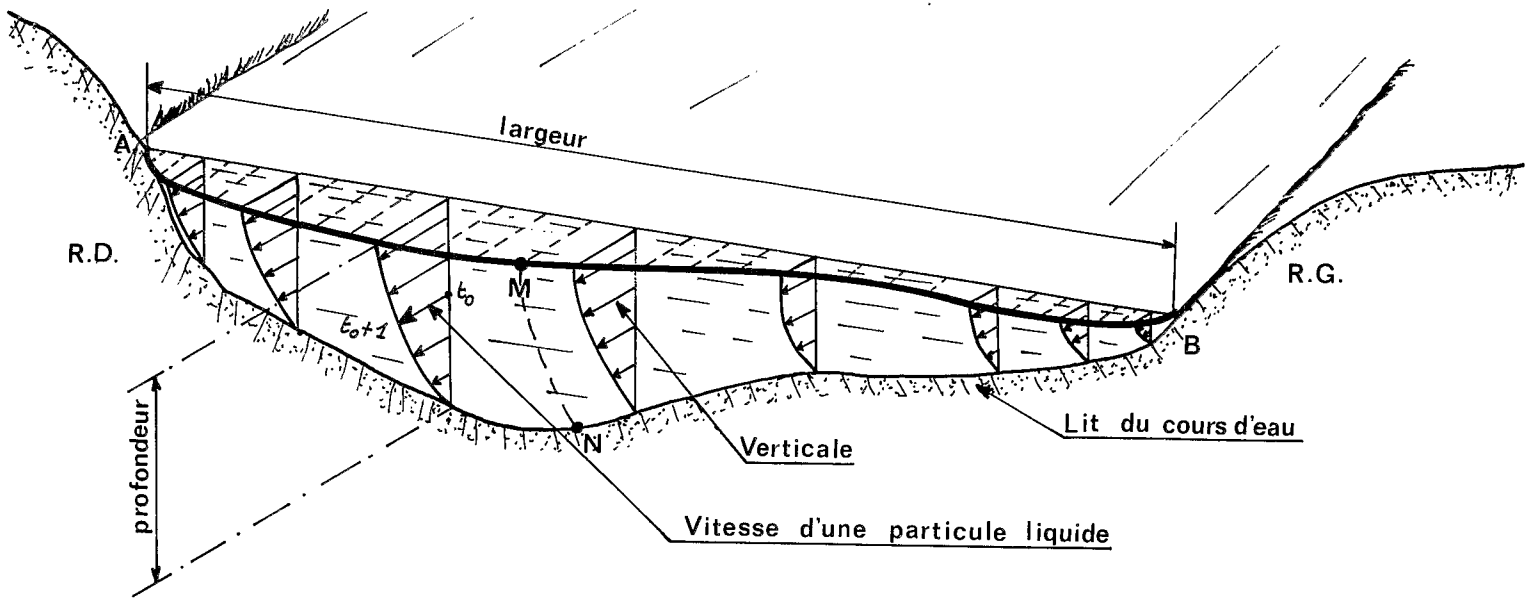
$$Q(m3/s) = V(m/s) \times S(m2) \qquad (1)$$

Cette formule implique V constant en tous les points de la section. Or, ceci ne se réalise jamais sur les fleuves et les rivières. La vitesse n'est pas constante à l'intérieur d'une section, elle varie d'un point à un autre par suite de la forme du lit à l'amont ou à l'aval de la rugosité des berges, de la végétation, des irrégularités du fond, etc... et en un même point , elle fluctue en grandeur et en direction dans le temps.

Une représentation en perspective cavalière du débit Q est donnée par la figure 3. Le débit est égal au volume d'eau contenu dans le trièdre curviligne limité par la droite AB et les courbes AMB (enveloppe des vecteurs vitesses des particules fluides en surface) et ANB (section du lit de la rivière par le plan vertical passant par la droite AB). La surface gauche limitée par les courbes AMB et ANB est le lieu géométrique à l'instant t_o + 1 seconde, des gouttes d'eau ayant quitté le plan vertical ANB à l'instant t_o ; c'est donc, en définitive, l'enveloppe des vecteurs vitesses de toutes les particules liquides de la section en travers.

Représentation du débit

Fig - 3



Si S est l'aire de la section de mesure et v la vitesse supposée constante à travers un petit élément $dS = dp \times d\ell$ (dp élément de la profondeur et $d\ell$ élément de la largeur) le débit dQ traversant cet élément de section sera donné, d'après (1), par :

$$dQ = v\, d\, S$$

et le débit total s'exprimera par :

$$Q = \iint_S v\, d\, S = \iint_S v\, dp\, d\ell \qquad (2)$$

qui peut s'écrire aussi :

$$Q = \int_P v\, d\, p \int_L d\ell = \int_L v\, d\ell \int_P dp \qquad (3)$$

P et L étant respectivement la profondeur et la largeur de la section à travers laquelle s'écoule le débit Q.

La première formulation de (3) indique qu'il faut définir une vitesse moyenne sur toute la profondeur et obtenir ainsi un "débit élémentaire" appelé aussi débit unitaire (souvent désigné par le symbole p u), suivant une verticale qui sera sommé ensuite sur toute la largeur. La deuxième formule de (3) montre que la vitesse moyenne peut être définie suivant une horizontale sur toute la largeur, puis le débit élémentaire ainsi calculé sera sommé sur toute la profondeur de la section.

On voit ainsi que la connaissance du débit n'est obtenue que par la mesure des vitesses en plusieurs points au sein de l'écoulement de façon à définir une vitesse moyenne. C'est ce qu'on appelle habituellement : mesure du débit par exploration du champ des vitesses. La méthode la plus couramment utilisée est l'exploration suivant des verticales réparties dans la section. Dans le cas de sections parfaitement calibrées et équipées de dispositifs de translation horizontale, on peut envisager parfois une exploration suivant des horizontales, mais cette façon de procéder est rarement utilisée.

En résumé :

Pour connaître le débit d'une rivière, on doit mesurer la vitesse en différents points de la section de façon à définir au mieux une vitesse moyenne U dans cette section.

La vitesse moyenne ainsi déterminée se rapprochera d'autant plus de la valeur vraie que :

- *le nombre de points de mesure est plus important,*
- *l'écoulement dans la section est parfaitement uniforme, avec des filets liquides bien parallèles entre eux,*
- *la variation de la cote du plan d'eau pendant la mesure est faible.*

Cependant, sur des rivières en crue, avec variation rapide de la cote à l'échelle, il est parfois préférable de diminuer un peu le nombre de points afin de rester dans des limites acceptables de variation de hauteur à l'échelle. Des précisions sur la répartition des points de mesures seront données lorsque nous examinerons les différentes méthodes de jaugeage. Nous verrons également que l'exploration du champ de vitesse peut se faire de plusieurs manières : soit point par point, le moulinet étant placé, face au courant, en différents points de la section repérés en abscisses et en ordonnées, soit par intégration, en laissant descendre ou remonter le moulinet à vitesse constante le long de verticales judicieusement réparties sur la largeur de la rivière.

En conclusion, la mesure du débit dans un cours d'eau est réalisé à partir de déplacements horizontaux et verticaux d'un appareil capable de détecter la vitesse du fluide en différents points définis par les dits déplacements.

Le chapitre II sera consacré à la description des matériels utilisés actuellement par les hydrométristes. Nous partirons de l'élément de base qu'est le moulinet. La progression sera telle que le lecteur verra se profiler la chaîne d'appareils indispensables, puis les variantes de montage tenant compte des conditions de mesure et des possibilités matérielles. Chaque fois, nous essaierons de donner les limites d'utilisation optimales.

I. 2.2. SUR QUELQUES CONSIDÉRATIONS PRATIQUES

Dans les paragraphes suivants, nous exposerons les différentes méthodes utilisées pour la mesure des débits en rivière. Mais avant d'entrer dans les détails, il nous semble utile de faire quelques remarques.

Les méthodes que nous décrirons par la suite sont applicables en tenant compte, dans chaque cas, des conditions locales (topographie, écoulement, etc...).

En matière de jaugeage en rivière, il est difficile de donner des directives générales valables en toutes circonstances. Chaque rivière, chaque station hydrométrique constitue toujours un cas particulier et ceci complique un peu notre tâche car il n'est pas possible de mettre au point des règles universelles. Les hydrométristes doivent avoir une connaissance parfaite des méthodes, savoir quels sont leurs domaines d'application et tenir compte des caractéristiques des écoulements pour les utiliser au mieux.

Dans la suite, nous examinerons certains paramètres qui interviennent dans la mesure des débits tels que angle de dérive du câble, angle du courant par rapport à la section droite, constante de fond, correction eau, correction air, etc... Ces grandeurs ne sont facilement mesurables que dans des situations idéales qui ne se trouvent réalisées qu'en moyennes et basses eaux ou lorsque les rivières présentent tout au long de l'année un régime très calme. Dans le cas de grandes crues sur les oueds d'Afrique du Nord ou sur les fleuves des régions soumises aux cyclones tropicaux, il y a du fait des conditions locales d'écoulement (très grandes vitesses, fortes vagues en surface, transports solides importants, charriage de fond constitué de graviers et même de rochers), des causes d'erreur tellement grandes qu'il vaut mieux,

dans l'intérêt de la mesure et pour la sauvegarde du matériel, négliger certains paramètres difficiles à mesureret dont la prise en compte n'améliore que très faiblement la valeur du résultat.

Dans ces conditions extrêmes, il faut faire vite et savoir doser les risques. En présence d'un crue exceptionnelle, l'essentiel n'est pas de définir l'angle de dérive du câble ou l'angle horizontal à quelques degrés près (opération difficile car le saumon se déplace dans tous les sens !!) mais c'est de pouvoir donner un ordre de grandeur acceptable du débit.

Dans ces situations, il arrive parfois que c'est le matériel le moins sophistiqué qui donne les résultats les plus sûrs : un flotteur naturel donnera, dans bien des cas, une bonne indication de la vitesse en surface alors que le moulinet le plus moderne risque d'être coincé par le sable ou d'avoir son axe faussé par un corps flottant.

N'oublions jamais que la règle d'or des hydrométristes devrait être la suivante : même dans les situations les plus difficiles, et en cas de défaillance du matériel classique, il existe toujours un moyen pour estimer le débit.

A notre avis, la précision d'une mesure de débit dépend presque essentiellement des caractéristiques de l'écoulement dans le cours d'eau. D'autres facteurs interviennent évidemment, en particulier l'état du matériel utilisé et le soin apporté par les opérateurs à la réalisation de la mesure. Mais toutes ces conditions étant égales par ailleurs, il est bien évident qu'il est plus facile de mesurer le débit de la crue exceptionnelle sur une rivière à écoulement lent et parfaitement uniforme que sur un torrent à courant violent ou sur un oued d'Afrique du Nord charriant de grandes quantités de matériaux aussi bien en surface qu'en suspension...

Dans le premier cas, le résultat aura plus de chances d'être obtenu avec une meilleure précision que dans le second.

Et sur une même rivière, le choix de l'emplacement du jaugeage, peut, par suite de conditions non identiques d'écoulement entraîner des résultats assez différents dans l'estimation du débit. Nous donnerons plus loin et en détail les principaux critères de choix d'une station de mesure. Mais comme nous avons, assez souvent, eu l'occasion de voir dans l'embarras des agents encore inexpérimentés, nous noterons dès à présent dans ce paragraphe d'introduction, que l'emplacement de la section de jaugeage n'est pas immuable. Elle doit se situer évidemment près de la station d'enregistrement des hauteurs d'eau. Il serait souhaitable qu'elle puisse se trouver exactement au droit de cette station. Malheureusement, cela n'est pas toujours possible. On se place alors à l'aval ou à l'amont compte tenu de la configuration du lit et des caractéristiques du courant.

Une section de mesure peut convenir en hautes eaux, mais n'est plus utilisable à l'étiage par suite de mauvaises conditions d'écoulement résultant des faibles débits. Dans ce cas, on définit deux ou plusieurs sections distinctes utilisables pour différentes gammes de débit. Il faut cependant veiller à ce qu'elles ne soient pas trop éloignées les unes des autres et qu'il n'y ait pas d'apports intermédiaires, ni fuites ou prélèvements.

Ces considérations valent pour les stations sans appareillage fixe. Avec les stations téléphériques, le choix de l'emplacement est fait de façon à donner les meilleurs résultats pour les mesures en très hautes eaux. Il se peut, dans ce cas, que l'on doive rechercher une section différente pour les mesures d'étiage.

Ceci peut paraître évident, mais il nous semble utile de le répéter afin qu'il n'y ait pas de doute dans l'esprit des hydrométristes débutants.

Encore une fois, nous tenons à souligner qu'il est difficile de donner des règles précises, valables dans tous les cas : le flair, l'expérience de l'hydrométriste doivent compenser dans une certaine mesure les lacunes inévitables de ce manuel.

I. 3. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MESURE

En général, l'hydrométriste ne dispose que d'un seul moulinet pour mesurer le débit d'une rivière. Les batteries de moulinets sont réservées aux mesures industrielles lors des essais de réception d'usines hydroélectriques, par exemple.

L'estimation de la vitesse moyenne sera donc obtenue en plaçant ce moulinet en différents points de la section repérés en abscisses et en ordonnées. En général, comme le montre la figure N° 3, le moulinet est placé en des points répartis sur des verticales espacées régulièrement en travers de la section.

Les différentes méthodes de mesure peuvent être classées en deux grandes catégories suivant, d'une part la répartition des points et les modalités de mesure et d'autre part la répartition des verticales en fonction de la rapidité des variations du plan d'eau.

Il est bien évident que cette division en deux catégories a été faite dans le but de rendre plus clair l'exposé. En réalité, la méthode utilisée pour réaliser un jaugeage est un assemblage des techniques décrites dans les deux classifications.

L'agent chargé de la mesure devra choisir en fonction de différents critères qui seront exposés de façon plus précise dans le chapitre III : opérations de terrain.

I. 3. 1. CLASSIFICATION SUIVANT LES MODALITÉS DE MESURE DE LA VITESSE SUR CHAQUE VERTICALE

Dans le paragraphe I.2 1. nous avons vu que la première opération à réaliser pour connaître le débit est la définition de la vitesse moyenne. Ceci peut être fait de façon précise à partir de l'exploration de la section en plusieurs points, par différents procédés : ce sont les méthodes complètes. La vitesse moyenne est quelquefois estimée plus sommairement à partir d'un nombre réduit de mesures soit en surface, soit au sein de l'écoulement : ce sont les méthodes incomplètes.

1.3 1 1. Mesures complètes

On groupe dans ce paragraphe, les mesures qui explorent la totalité de la verticale d'une façon continue ou discontinue. On distingue :

1.3 1 1 1. Méthode par points

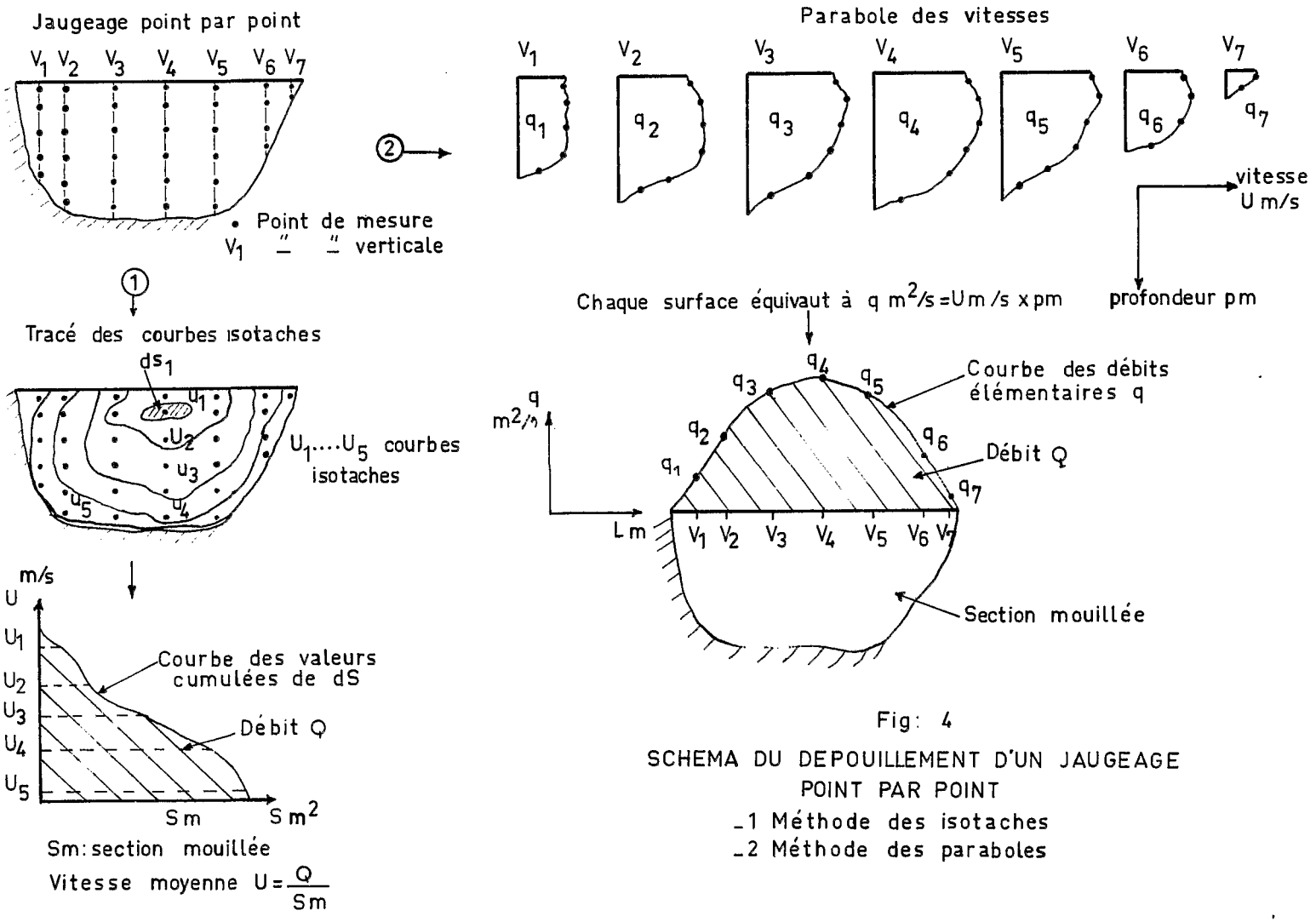
L'appareil de mesure est positionné successivement en différents points sur la verticale. Chaque point est repéré en ordonnée (profondeur) et la vitesse y est mesurée pendant un temps suffisamment long (au moins 30 secondes). Le nombre de points doit être égal au moins à cinq par verticales.

La vitesse moyenne sera obtenue soit par intégration graphique (méthode des paraboles et méthode des isotaches ou courbes d'égale vitesse dans la section) soit par des méthodes arithmétiques.

Les principes des différentes méthodes de calcul sont les suivants :

- Reprenons la formule (2) du paragraphe 1.2 1.

$$Q = \iint_S v \, d \, S$$



Sm: section mouillée

Vitesse moyenne $U = \frac{Q}{Sm}$

Fig: 4

SCHEMA DU DEPOUILLEMENT D'UN JAUGEAGE POINT PAR POINT

_1 Méthode des isotaches

_2 Méthode des paraboles

v étant la vitesse constante dans un élément de surface d S. Ceci revient à tracer sur le plan de la section de jaugeage, en s'appuyant sur les valeurs de la vitesse mesurées à chaque verticale, des lignes d'égale vitesse (appelées aussi isotaches ou isodromes) et à faire la sommation des surfaces élémentaires comprises entre les isotaches. C'est la méthode des isodromes ou des isotaches qui est résumée sur la figure 4.

- Dans la formule (3) du même paragraphe :

$$Q = \int_P v \, d \, p \int_L dl$$

la première intégrale représente la surface du graphe obtenu en portant en abscisse les vitesses mesurées au droit des points de cette verticale portés en ordonnée suivant la profondeur. Ce graphe est appelé couramment profil des vitesses sur une verticale ou aussi parabole des vitesses. La première intégration donnera le débit élémentaire ou débit unitaire sur la verticale considérée exprimé en m2/s

$$dq = \int_P v \, d \, p$$

C'est la méthode des paraboles représentée aussi sur la figure 4. L'intégration de tous les débits élémentaires suivant la largeur donne le débit total.

- Une moyenne pondérée, suivant diverses formules, des vitesses mesurées sur la verticale, donne la vitesse moyenne. Cette vitesse moyenne multipliée par la profondeur, donnera le débit élémentaire sur la verticale en m2/s. L'intégration sur la largeur se fait ensuite par la méthode des trapèzes. C'est la méthode arithmétique de dépouillement.

Ces méthodes seront examinées en détail dans le chapitre IV : travaux de bureau.

I.3 1 1 2. Méthode par intégration

Le jaugeage par intégration se pratique en déplaçant le moulinet à vitesse constante le long de chaque verticale. L'intégration peut s'effectuer de bas en haut ou de haut en bas, suivant le type de matériel dont on dispose.

Le déplacement du moulinet à vitesse très lente (de l'ordre de 1/100 de la vitesse du courant à mesurer) et constante le long de la verticale, donne directement la vitesse moyenne sur cette verticale. Ceci se démontre aisément.

Nous reprendrons la démonstration de M. ROCHE * :

Soit un moulinet dont la formule de tarage est :

$$u = a \frac{n}{t} + b \qquad (1)$$

dans laquelle u est la vitesse du courant et n le nombre de tours d'hélice enregistré pendant le temps t.

Soit P la profondeur totale et v la vitesse de déplacement du moulinet, supposée constante. Sur un élément dp de la profondeur P, on a une vitesse du courant u qui peut être considérée comme constante. Le moulinet mettra un temps $dt = \frac{dp}{v}$ pour parcourir l'élément dp (v est, en général, suffisamment petit par rapport à u pour que son influence sur u soit négligeable). Pendant le déplacement le long de l'élément dp, on comptera un nombre de tours d'hélice dn répondant à la relation :

$$u = a \frac{dn}{dt} + b \iff u = a \frac{vdn}{dp} + b$$

(puisque $dt = \frac{dp}{v}$)

d'où : $dn = \frac{u - b}{va} dp$

---

* Hydrologie de surface par M. ROCHE pages 198 et 199.

Si N est le nombre total de tours enregistrés sur la profondeur P, en un temps $T = \frac{P}{v}$, on a :

$$N = \int_o^P \frac{u - b}{va} \, dp$$

La vitesse U correspondante, calculée par la formule (1) sera :

$$U = a\frac{N}{T} + b = \int_o^P \frac{au}{vaT} \, dp - \frac{ba}{vaT} \int_o^P dp + b$$

Or : $vT = P$ et $\int_o^P dp = P$

d'où : $$\boxed{U = \frac{1}{P} \int_o^P udp}$$

Ce qui est l'expression de la vitesse moyenne le long de la verticale.

Le jaugeage par intégration, donnant donc directement la vitesse moyenne sur la verticale, permet la réalisation de mesures plus rapides et plus complètes.

Nous verrons plus loin que le montage du moulinet ne permet pas d'explorer la totalité de la verticale : le moulinet est arrêté à une certaine distance du lit de la rivière du fait de la constante de fond du montage. Nous donnerons une méthode qui permet d'apporter une correction suffisamment approchée.

I. 3 1 1 3. Méthode des flotteurs lestés

Nous citerons cette méthode pour mémoire car elle est assez peu utilisée. Son application ne peut être faite que dans des sections parfaitement calibrées en profondeur sur une certaine longueur. Elle donne de bons résultats dans le cas de vitesses très faibles où l'utilisation des moulinets n'est plus possible.

Le principe est le suivant : la vitesse moyenne de l'eau est obtenue en chronométrant le temps mis par un flotteur lesté, immergé sur une profondeur égale au 4/5 environ du tirant d'eau, pour parcourir une certaine distance dont la longueur dépend de la vitesse du courant. Pour que la mesure soit correcte, il faut que le tirant d'eau soit constant sur toute la longueur du déplacement du flotteur afin qu'il n'y ait pas de risque de frottement sur le fond.

Les flotteurs peuvent être constitués par des morceaux de bois cylindriques ou carrés lestés à une extrémité par des boulons dont le nombre est déterminé par tâtonnements (5 à 6 boulons de Ø 10 pour un mètre de longueur). On peut également réaliser ces flotteurs avec des tubes en P.V.C. bouchés à une extrémité et lestés sur place avec de l'eau ou du sable.

Pour avoir la vitesse moyenne avec une précision convenable, il faut être sûr que le flotteur couvre au moins les 3/4 de la profondeur. Il faut également que le flotteur soit immergé verticalement, la partie hors de l'eau étant la plus réduite possible.

Le débit total est obtenue à partir du débit unitaire sur chaque verticale calculé en faisant le produit de la vitesse mesurée par une profondeur fictive p égale à la moyenne arithmétique de la profondeur réelle et de la longueur immergée du flotteur. Cette règle empirique est utilisée pour tenir compte du fait que la vitesse mesurée est légèrement supérieure à la vitesse moyenne vraie, le flotteur n'explorant que la tranche supérieure de l'écoulement.

I.3 1 2.Mesures incomplètes

I.3 1 2 1. Exploration incomplète de la profondeur

Cette façon de procéder peut être soit systématique, c'est le cas des méthodes américaines avec mesure en un ou deux points sur chaque verticale, soit accidentelle lors des crues violentes avec transports importants en surface.

- Méthodes américaines : Ces méthodes, que l'on peut également qualifier de jaugeages simplifiés point par point, sont très utilisées en Amérique et donnent une approximation de la vitesse moyenne par mesure du courant en deux points (2/10 et 8/10 de la profondeur : $V_m \neq \frac{V_{0,2} + V_{0,8}}{2}$) ou en un point (6/10 de la profondeur : $V_m \neq V_{0,6}$).

Ce choix a été fait après examen de nombreux jaugeages réalisés sur les fleuves d'Amérique, études qui ont permis de conclure que les vitesses en ces points sont très voisines de la vitesse moyenne.

Ces méthodes ne sont pas utilisées au service hydrologique de l'ORSTOM.

- Mesures incomplètes accidentelles : Ceci peut se produire au cours d'un jaugeage complet par grande crue. Sur quelques verticales, situées dans la zone de courant maximal qui est, de plus, celle où les charriages en surface sont les plus abondants, il peut arriver qu'il ne soit pas possible d'explorer toute la profondeur du fait des risques de perte ou de détérioration du matériel. Dans ce cas, ne seront réalisées, en prenant toutes les précautions pour éviter des incidents, que quelques mesures au voisinage de la surface ou même, le plus souvent, qu'une seule mesure en surface.

L'estimation de la vitesse moyenne sera faite par comparaison avec les mesures complètes déjà effectuées sur ces verticales et les mesures partielles obtenues au cours de la/ou des crues exceptionnelles.

Une mesure partielle, extrapolée avec soin par comparaison avec des mesures complètes, donnera une estimation correcte du débit élémentaire avec lequel il sera possible de "récupérer" valablement un jaugeage ou d'extrapoler vers les débits élevés les courbes d'étalonnage de certaines verticales. Cependant, il n'est pas question d'en déduire qu'il suffit de faire quelques mesures complètes de temps en temps.

I.3 1 2 2. Superficielles

Par très forte crue, les vitesses d'écoulement atteignent des valeurs telles qu'il devient impossible de faire, avec un moulinet, un jaugeage complet par exploration du champ des vitesses.

En effet, dès que la vitesse dépasse 4 à 5 m/s, la dérive des instruments de mesure même montés sur des poids de lestage très lourds (100 kg) devient très importante et, de plus, les transports solides en surface et aussi en suspension ou saltation peuvent entraîner la perte ou la détérioration du matériel.

Dans ces cas extrêmes, l'estimation du débit est encore possible en mesurant les vitesses superficielles :

- soit avec le moulinet si son immersion ne présente pas trop de risques,

- soit à l'aide de flotteurs naturels (corps flottants, arbres, etc...) ou artificiels (bouteilles lestées, etc...).

On obtient ainsi un certain nombre de points de mesures répartis sur toute la largeur de la rivière à l'aide desquels il est possible de définir la vitesse moyenne en surface : Vms

La section de mesure étant connue (à partir de jaugeages complets réalisés pour des cotes plus faibles), le débit s'obtient directement :

$$Q = K \; Vms \; . \; S$$

K étant le coefficient de correction, à appliquer à Vms pour avoir la vitesse moyenne dans toute la section : K = U/Vms . Ce coefficient se déduit des jaugeages complets pour lesquels U vitesse moyenne, et Vms sont connus.

S'il n'y a pas eu de jaugeages à la station et si l'on n'a aucune indication sur la variation de U/Vms dans la section que l'on étudie, on pourra prendre les valeurs suivantes :

Vitesses fortes, profondeurs supérieures à 4 m ---------- 1,00
Vitesses moyennes en rivières de montagne ---------- 1,05
Faibles pentes, rivières moyennes ---------- 0,85
Grands fleuves ---------- 0,95
Pentes moyennes, rivières moyennes ---------- 0,90 à 0,95
Vitesses très faibles ---------- 0,80

En Algérie, G. JACCON préconise les valeurs suivantes :

. K = 1,00 pour des écoulements sans ressaut (pas de vagues)

. K = 1,05 pour des écoulements avec ressauts stationnaires (écoulements surcritiques caractérisées par de fortes ondulations quasi permanentes).

Réalisés dans de bonnes conditions, les jaugeages aux flotteurs peuvent donner de bons résultats et ils doivent être utilisés chaque fois que les méthodes classiques ne peuvent pas être appliquées.

Le mode opératoire sera développé dans le chapitre opérations sur le terrain et travaux de bureau.

I. 3. 2. CLASSIFICATION SUIVANT LA RÉPARTITION DES VERTICALES EN FONCTION DE LA RAPIDITÉ DES VARIATIONS DU PLAN D'EAU

Les mesures de débit doivent permettre le tracé de la courbe d'étalonnage Q = f(H) à la station considérée. A une valeur du débit correspond une hauteur à l'échelle parfaitement définie.

Or, une mesure de débit en rivière est une opération qui peut demander plusieurs heures. Pendant ce temps, la stabilité du plan d'eau n'est pas toujours réalisée ; il se peut, par suite des caractéristiques topographiques du cours d'eau, qu'en un instant donné la variation du plan d'eau soit plus ou moins rapide. Certaines rivières à pente faible présentent des crues dont la montée s'étend sur plusieurs jours ou même plusieurs semaines et est de l'ordre de quelques centimètres par jour. Par contre, dans d'autres régions, les crues sont beaucoup plus rapides et la montée du plan d'eau est de plusieurs dizaines de centimètres à l'heure, voire de quelques mètres : nous avons vu dans le sud de Madagascar, une montée de 2 à 2,50 m en une vingtaine de minutes environ.

Dans le premier cas, pendant la mesure, le plan d'eau sera pratiquement stable et au débit mesuré correspondra une hauteur à l'échelle bien définie, tandis que dans le second, la variation de cote sera très grande et la représentation, sur un graphe Q(H), du résultat de la mesure ne sera pas aisé.

Nous voyons donc que l'hydrométriste risque d'être placé dans deux situations totalement différentes qui nécessitent des méthodes appropriées à chaque cas pour arriver à des résultats corrects.

Sur une rivière à variation de plan d'eau lente, l'agent chargé de la mesure peut prendre son temps : c'est le cas classique. Sur les rivières soumises à des crues très rapides et violentes, il faut essayer d'obtenir une mesure de débit correspondant à la variation la plus faible possible de la cote à l'échelle. Pour cela, on établit d'abord la courbe d'étalonnage sur chaque verticale et on définit ensuite à partir de tous ces résultats la courbe d'étalonnage de la section pour différentes hauteurs à l'échelle : c'est la méthode du jaugeage continu par verticales indépendantes.

1.3 2 1. *Variation lente : cas classique*

On définit un certain nombre de verticales (de 12 à 20) comme indiqué dans le paragraphe "opérations sur le terrain". Ces verticales peuvent être légèrement différentes d'un jaugeage à l'autre : leur position dépend de la largeur du plan d'eau au moment de la mesure. Sur chaque verticale, on utilise, soit la méthode point par point, soit la méthode par intégration suivant les caractéristiques de l'écoulement. On note la cote à l'échelle au début et à la fin de la mesure. On peut également faire observer l'échelle à intervalles réguliers (toutes les 10 minutes par exemple) pendant la durée du jaugeage . Si la section est équipée d'un limnigraphe, on note sur la feuille le début et la fin du jaugeage à l'aide de repères tracés sur le limnigramme.

La mesure sera ensuite dépouillée au bureau. De plus amples détails sur le mode opératoire et le dépouillement seront donnés dans les chapitres suivants.

1.3 2 2. *Variation rapide - jaugeage continu par verticales indépendantes préfixées.*

Le principe de cette méthode est le suivant : s'il faut une heure pour faire un jaugeage complet (10 à 12 verticales en moyenne), il faudra 4 à 5 minutes compte tenu des déplacements du matériel, pour explorer une verticale. La variation de la cote à l'échelle pendant la mesure sur une verticale sera très faible, de l'ordre de quelques centimètres. En réalisant pour chaque verticale une série de mesures réparties sur toute la variation du plan d'eau, il sera possible de tracer une courbe d'étalonnage représentant la relation entre les hauteurs et les débits unitaires mesurés sur les différentes verticales.

A l'aide des courbes d'étalonnage par verticales ainsi obtenues, on peut ensuite définir pour chaque verticale une série de débits unitaires correspondant à des cotes à l'échelle, choisies arbitrairement. L'intégration de ces débits unitaires sur toute la section donnera pour les différentes hauteurs choisies, les débits qui permettront le tracé précis de la courbe de tarage de la section.

De ce qui précède, nous déduisons les règles impératives à respecter pour l'application de cette méthode :

- Faire les mesures toujours aux mêmes verticales quelle que soit la cote à l'échelle,

- Jauger pendant toute la durée de la crue, sans interruption,

- Noter la cote à l'échelle au début et à la fin de chaque verticale.

L'exploration des verticales se fera par points ou par intégration suivant le matériel dont on dispose. La mesure par intégration est préférable chaque fois que cela est possible, car le temps passé sur chaque verticale est réduit dans des proportions assez importantes par rapport à la mesure point par point.

Pour résumer le paragraphe I.3 nous dirons que :

La mesure du débit s'effectue soit suivant la méthode classique, soit par la méthode du jaugeage continu par verticales indépendantes en fonction des caractéristiques de l'écoulement dans la rivière. L'exploration de chaque verticale est faite de manière complète points par points, par intégration ou par flotteurs lestés en fonction du matériel dont on dispose ou de manière incomplète par mesures superficielles lorsque les méthodes ci-dessus ne peuvent pas, pour une raison ou une autre, être appliquées.

Dans tous les cas, l'opération de mesure de débit s'appelle un jaugeage et fait correspondre un débit Q à un niveau H. L'ensemble des couples Q,H ainsi obtenus définit la courbe d'étalonnage de la station hydrométrique.

I. 4. LES DIFFÉRENTS MODES OPÉRATOIRES

Il est également possible de classer les méthodes de mesure en fonction du mode opératoire adopté pour la réalisation du jaugeage. Ce mode opératoire dépend des caractéristiques de la rivière, de l'équipement de la station hydrométrique et du matériel dont on dispose.

Nous distinguerons :

I. 4. 1. MESURES A GUÉ

Cette méthode, désignée en pays anglo-saxons sous le terme de "wading" n'est utilisable que dans des sections peu profondes (maximum 1 m) et avec des vitesses faibles (<1 m/s).

L'opérateur, équipé de grandes bottes ou d'un maillot de bain suivant la saison ou la zone climatique, se place dans l'eau et tient directement à la main le matériel : généralement moulinet monté sur perche.

La position des points de mesure est repérée en ordonnées (profondeur) à l'aide des graduations portées sur la perche et en abscisses (largeur) à partir d'un double décamètre, d'un cable gradué ou d'un compteur centimétrique roulant sur un cable placé en travers de la rivière et matérialisant la section de jaugeage.

La position de l'opérateur doit être telle que la perturbation apportée à l'écoulement soit la plus faible possible : appareil de mesure tenu face au courant le plus loin possible vers l'amont, jambes écartées. La perche doit toujours reposer sur le fond : le moulinet est déplacé soit à la main, soit à l'aide de coulisses spéciales, soit à l'aide d'un petit moteur électrique.

I. 4. 2. MESURES A PARTIR D'UN PONT OU PASSERELLE

Si la section de jaugeage est située près d'un pont ou d'une passerelle, l'appareil de mesure sera déplacé à partir de ces ouvrages avec du matériel approprié : perche suspendue à un support (pied de perche ou chariot treuil) dans le cas de passerelle sans garde-corps ou treuil avec poids de lestage monté sur porte-à-faux simple, porte-à-faux sur véhicule, cyclopotence manuelle ou motorisée dans le cas d'un pont avec parapet.

La position des points de mesure est donnée en ordonnée par les graduations de la perche ou les indications d'un compteur de profondeur monté sur le treuil de manoeuvre et en abscisses par un décamètre tendu le long du pontou de la passerelle ou de graduations définitives portées sur le tablier du pont ou de la passerelle et repérées une fois pour toutes.

Avec une perche montée sur pied support on peut jauger avec des profondeurs < 1 m et des vitesses < 1 m/s. Ces limites sont un peu augmentées avec la perche manoeuvrée par un chariot treuil : $P < 2$ m et $V < 2$ m/s environ. Avec une cyclopotence, les profondeurs peuvent atteindre 10 m et les vitesses 3 m/s.

I. 4.3. MESURES A L'AIDE D'UN BATEAU

En l'absence de pont, le matériel de jaugeage est déplacé dans la section de mesure à l'aide d'un bateau. La taille du bateau et le mode opératoire dépendent évidemment des conditions hydrauliques.

I.4 3 1. Bateau et câble

Pour des profondeurs > 1 m, des vitesses < 3 m et une largeur de rivière inférieure à 300 m, le bateau est déplacé en travers de la section à partir d'un câble tendu qui est utilisé pour repérer les abscisses (graduation ou compteur). Les profondeurs sont mesurées avec le compteur du treuil. Dans le cas du contrôle des stations d'un réseau hydrométrique effectué par la route, le bateau que l'on utilise est généralement un bateau gonflable capable de de supporter une charge de une tonne environ et propulsé par un moteur hors-bord de 20 à 25 CV maximum. Le poids de lestage ne dépasse jamais 25 kg : c'est ce que nous appelons l'équipement léger.

I.4 3 2. Bâteau et cercle hydrographique

Si la rivière mesure plus de 300 m de large au droit de la section de mesure, il est très difficile de mettre en place un câble. La position des verticales est repérée par rapport à des balises installées sur les berges et portées sur un plan obtenu par un lever topographique précis : balises d'alignement matérialisant la section et balises d'angle pour définir la position de la verticale. On utilise pour cette opération un cercle hydrographique, appareil dérivé du sextant permettant de mesurer les angles dans un plan horizontal. Le bateau est maintenu en position dans la section à l'aide d'une chaîne et d'une ancre.

Un jaugeage au cercle peut être réalisé avec l'équipement léger (bateau gonflable et moteur de 20 CV). Mais dans le cas de grands fleuves et de tournées de mesures effectuées par voie d'eau on peut opérer à l'aide du bateau de grandes dimensions utilisé aussi pour les déplacements : c'est l'équipement lourd. On dispose alors de treuils plus importants qui permettent la manoeuvre de saumons de 50 à 100 kg.

Les opérations de repérage des verticales sont simplifiées si l'on dispose d'un télémètre de précision. Les distances sont mesurées directement à partir des balises d'alignement situées près de chaque berge.

La position du bateau dans la section de jaugeage peut également être relevée à l'aire d'un théodolite mis en station sur la berge.

I. 4. 4. MESURES A PARTIR DE TRANSPORTEURS AÉRIENS

Lorsque les vitesses deviennent importantes (> 3 m/s) la mesure des débits sera réalisée à partir de transporteurs aériens appelés aussi stations téléphériques.

Elles comportent un ensemble de câbles et de treuils permettant le déplacement de matériel lourd de mesure en travers de la rivière. Les manoeuvres sont effectuées à partir de la berge ; les treuils sont pourvus de compteurs de distance et de profondeur permettant de positionner avec précision l'appareil de mesure.

Les transporteurs aériens sont parfois étudiés pour le déplacement du personnel et du matériel sur une nacelle. Ce montage est assez rarement utilisé pour les mesures de débit en Afrique.

Dans la suite de ce manuel, nous ne parlerons que des stations téléphériques permettant le déplacement du matériel. Nous supposerons de plus que ces stations existent. Leur installation est une opération délicate et son exposé sort du cadre de ce manuel.

En résumé, les mesures de débit au sein de l'écoulement sont réalisées point par point ou par intégration en utilisant la méthode classique ou la méthode du jaugeage continu par verticales indépendantes, le matériel de mesure étant manoeuvré à l'aide d'appareillages qui dépendent des conditions hydrauliques dans la section et de l'équipement de la station hydrométrique.

II MATÉRIEL UTILISÉ POUR LA MESURE DES VITESSES

On distinguera le matériel destiné à la détection de la vitesse et le matériel annexe servant de support et utilisé pour les déplacements du premier.

II. 1. DÉTECTION DE LA VITESSE

II. 1. 1. APERÇU DES DIVERS APPAREILS UTILISÉS POUR LA MESURE DE LA VITESSE D'UN FLUIDE

La vitesse d'un fluide peut être détectée soit par des mesures indirectes soit par des mesures directes.

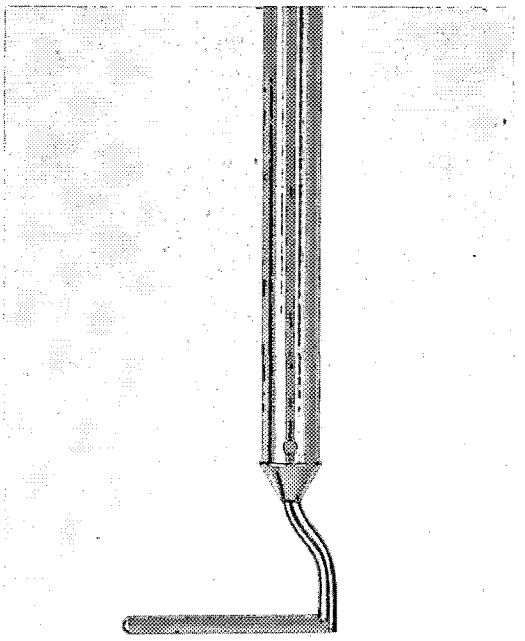
II.1 1 1. Mesures indirectes

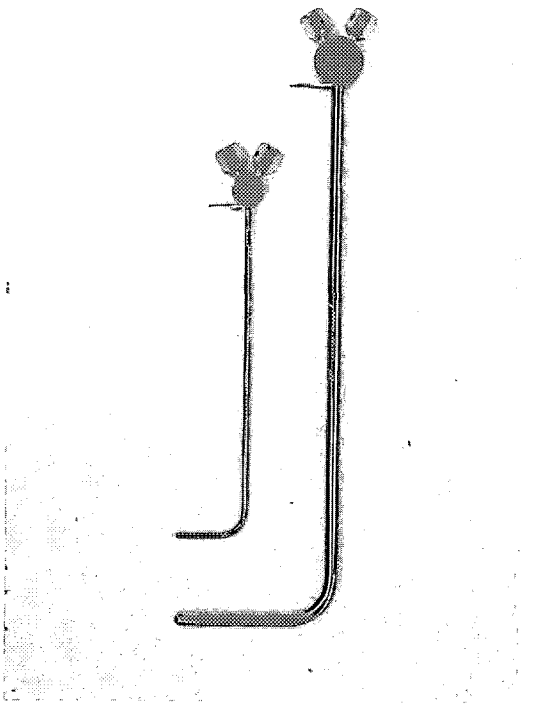
Elles sont réalisées à l'aide d'appareils tels que le tube de PITOT (figure 5) et autres sondes dérivées du même principe (sonde cylindrique à trois trous, sphère à cinq trous, etc...). Ces appareils utilisés uniquement en laboratoire mettent en évidence une différence de hauteur manométrique, Δh , d'où l'on tire la valeur instantanée de la vitesse :

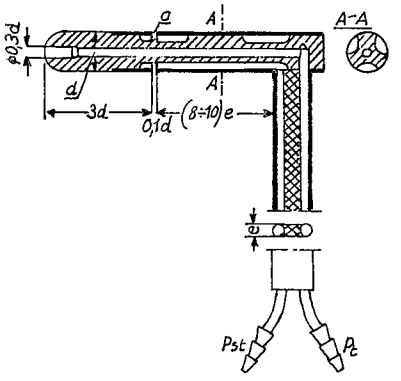
$$V = K \sqrt{2 g h}$$

TUBES DE PITOT

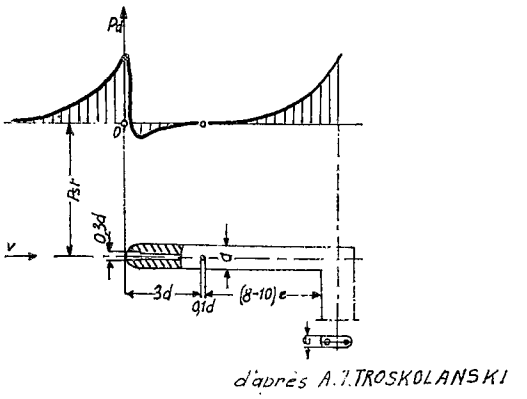
Disposition de Prandtl







Tube de PRANDTL



Répartition des pressions le long d'un tube de PRANDTL

Fig_ 5

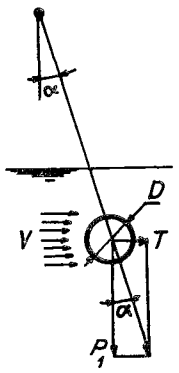
Dans le cas des sondes à fil chaud, le principe repose sur le phénomène d'échauffement d'un fil conducteur traversé par un courant électrique et refroidi simultanément par le fluide en mouvement dans lequel il est placé. Il existe une relation entre la vitesse du fluide et la température du fil. Cette méthode, classique pour les fluides gazeux, n'est, avec les liquides, utilisée qu'en laboratoire.

Un autre appareil, plus rudimentaire, utilisé quelquefois sur le terrain, est le pendule hydraulique. Une sphère de caractéristiques connues, suspendue à un fil fin et plongée dans un écoulement à surface libre de vitesse V, prend une position d'équilibre. Cette position est fonction de la vitesse au point considéré. L'équipe d'hydrologues de NEDECO[1] utilisaient un appareil de ce type sur la BENOUE et le NIGER. La position d'équilibre du pendule est repérée sur une demi-sphère métallique avec méridiens et parallèles. La précision de la mesure est assez faible (figure 6).

---

(1) Netherlands Engineerings Consultants.

Pendule hydraulique



D diamètre de la sphère
S maître - couple = $\pi D^2/4$
$P_1 = (\pi D^3/6)\rho_1 g$ poids apparent de la sphère dans le liquide
C_X coefficient de trainée
T trainée de la sphère
ρ masse spécifique du liquide
ρ_1 masse spécifique apparente de la sphère
v viscosité cinématique du liquide
V vitesse du courant
$\mathcal{R}$ = VD/v = nombre de REYNOLDS
α angle du fil avec la verticale

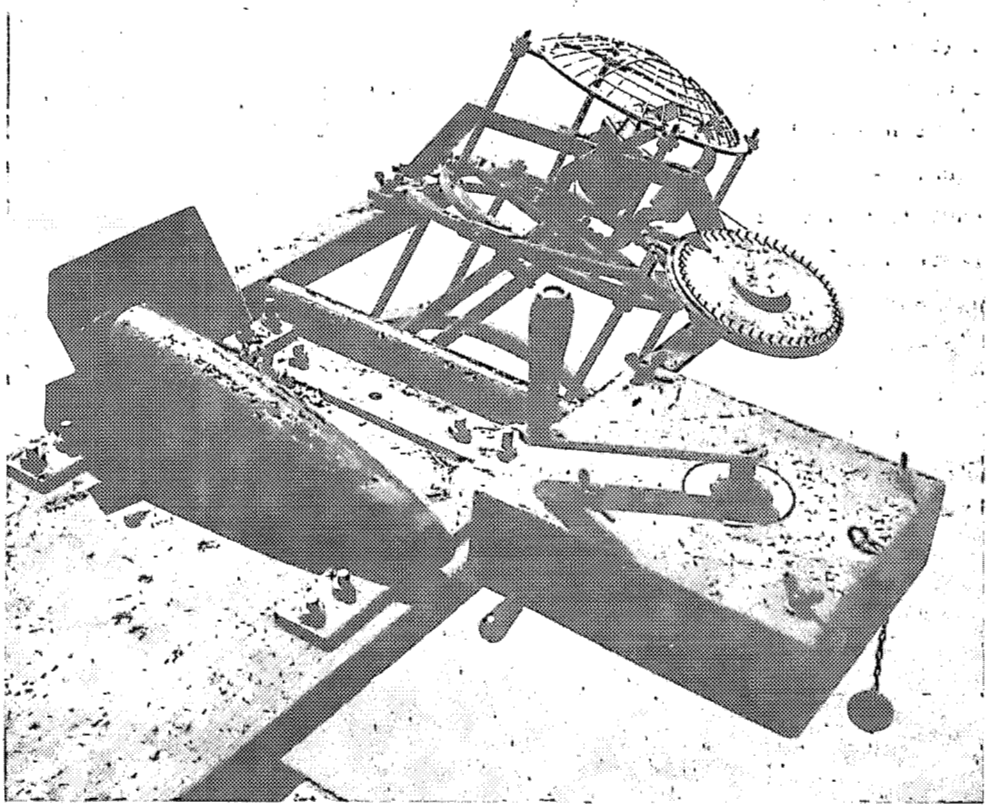
le fil de suspension étant supposé assez fin pour ne pas avoir de trainée, il reste rectiligne et on a :

$$\operatorname{tg}\alpha = T/P_1 = C_X S\rho V^2/2\ P_1$$

Pour $10^3 < \mathcal{R} < 10^5$ on pourra prendre $C_X \simeq 0{,}40$
et l'on aura : $V \simeq 1{,}82\sqrt{(\rho_1/\rho)\, g\, D \operatorname{tg} x}$

Principe du pendule hydraulique

d'après J. RIGARD



Pendule hydrométrique utilisée par NEDECO _photo Aldegheri_

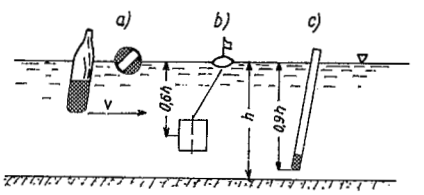
Fig_6

II.1 1 2. Mesures directes

On utilise les flotteurs ou les moulinets.

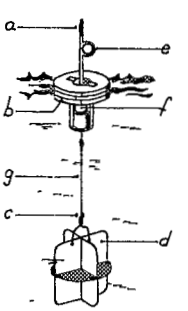
Les flotteurs servent à la détermination des vitesses en surface (flotteurs naturels : arbres, débris divers, etc... ou artificiels : bouteilles lestées, etc...) ou en profondeur, vitesse moyenne sur une verticale (bâtons lestés, etc...). La figure 7 montre quelques types de flotteurs et en particulier un dispositif permettant la mesure en profondeur et aussi la nuit par adjonction d'une lampe à acétylène ou électrique. Nous ne nous étendrons pas davantage sur ce type de matériel, ajoutons simplement que malgré sa rusticité, il peut donner des résultats valables à condition de ne pas avoir trop de prise au vent. Les flotteurs articiels sont faits avec des matériaux de couleurs voyantes ou sont pourvus de petits drapeaux visibles de loin des plus utilisés sont les arbres à la dérive.

FLOTTEURS



Flotteurs : a) de surface ; b) doubles ou conjugués ; c) bâtons flotteurs lestés

d'après A.T. TROSKOLANSKI



a) Bec lumineux
b) Flotteur
c) Réglage de l'immersion
d) Empennage moteur réglable
e) Tubulure réglable en altitude
f) Générateur d'acétylène
g) Chaînette de suspension

d'après J. RIGARD

Fig - 7

Le moulinet hydrométrique est un appareil muni d'un rotor dont la vitesse de rotation est fonction de la vitesse locale du fluide dans lequel il est immergé. Les moulinets sont des appareils qui mesurent le chemin parcourupar le liquide durant un temps déterminé. On obtient ainsi la vitesse moyenne ponctuelle du fluide : en réalité c'est la vitesse moyenne de la veine du fluide, de section égale à celle balayée par le rotor de l'appareil.

Il existe deux type de moulinets : à coupelles ou à axe vertical et à hélice ou à axe horizontal.

Les moulinets à coupelles (GURLEY, PRICE) sont d'une utilisation courante en Amérique du Nord. Ils ne sont pratiquement pas utilisés en Europe ou en Afrique. Dans la suite de ce manuel, nous ne parlerons que des moulinets à hélice.

Le premier moulinet hydrométrique a été construit en 1790 par l'Inspecteur des Travaux Hydrauliques REINHARD WOLTMAN. Cet instrument comportait un rotor à ailettes entraînant, par l'intermédiaire d'une vis sans fin, un compteur sur lequel on lisait directement le nombre de tours effectués par le rotor. Un premier perfectionnement a été apporté en 1820 avec le remplacement des hélices à rais (ou ailettes) par des hélices à surfaces hélicoïdales (figure 8).

Moulinet I à compteur mécanique, *type Etsch*

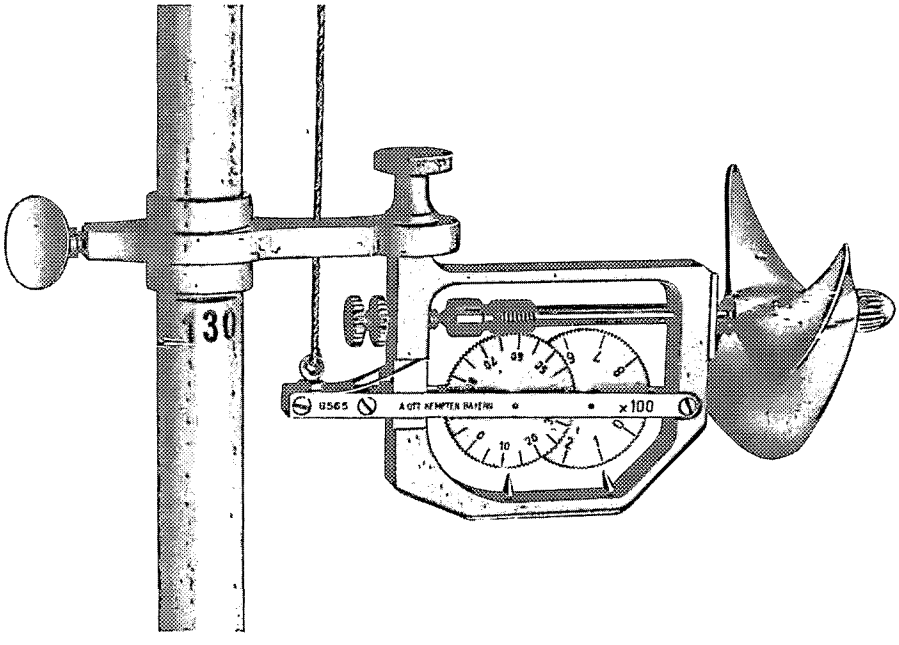


Photo OTT

Fig. 8

On a très vite remplacé le compteur à lecture directe par un système de signalisation électrique (générateur d'impulsions) et en 1929, la Société OTT lance le moulinet ARKANSAS type V, dont la fabrication est maintenant arrêtée mais qui est toujours utilisé par de nombreux services hydrologiques en Europe et en Afrique.

En utilisant une expression tirée du vocabulaire informatique, nous pouvons dire que les moulinets de la première génération comportent un compteur à lecture directe, les moulinets de la deuxième génération sont équipés d'un générateur d'impulsions qui, associé à un détecteur d'impulsions, permet de connaître rapidement la vitesse de rotation de l'hélice et de là, par étalonnage préalable, la vitesse du courant. La société OTT vient de sortir un moulinet de troisième génération : l'hélice entraîne une génératrice à courant continu qui délivre aux bornes une tension proportionnelle à la vitesse du courant ; la mesure ou l'enregistrement de cette tension, donne directement, après étalonnage préalable, la vitesse du fluide.

Actuellement, l'appareil le plus couramment utilisé pour la mesure des vitesses en rivière est le moulinet de deuxième génération associé à un détecteur d'impulsions. Le moulinet de troisième génération vient d'être lancé sur le marché ; il permet de connaître directement la vitesse par la mesure d'une tension continue aux bornes de l'appareil.

De nouveaux appareils sont à l'étude chez divers constructeurs et certains dépassent déjà le stade du prototype. Ils bénéficient du développement rapide de l'électronique et mettent en oeuvre des techniques électromagnétiques et ultrasoniques. Nous en parlerons plus en détails dans le chapitre II.1 4.

Les chapitres suivants sont consacrés à la description des moulinets à axe horizontal à signalisation électrique,des détecteurs d'impulsion qui lui sont associés et du moulinet à génératrice de courant continu. Nous décrirons ensuite les différents supports de moulinets et le matériel utilisé pour les déplacements verticaux et horizontaux.

II. 1. 2. LES MOULINETS A HÉLICE

Après avoir fait un essai de classification des divers moulinets à hélice, nous parlerons de l'élément essentiel de ces appareils : l'hélice. Nous donnerons également un aperçu des méthodes de tarage. Nous donnerons en annexe la description plus détaillée de quelques moulinets usuels.

Nous nous limiterons au matériel mis sur le marché par les constructeurs les plus connus d'Europe Occidentale : les anciens établissements NEYRPIC, Département Mesures de la Société ALSTHOM Atlantique à Grenoble et la Société OTT en Allemagne Fédérale.

II.1 2 1. Les différents types de moulinets

Tous les moulinets à hélice, quel que soit leur type, comportent :

= *1 équipage mobile qui, lorsqu'il est plongé dans un liquide en mouvement tourne d'autant plus vite que la vitesse du fluide est plus grande,*

= *1 dispositif permettant, après étalonnage préalable de l'appareil, de connaître cette vitesse.*

Ce dispositif est constitué soit par :

- un compteur à lecture directe dans les premiers modèles (maniement peu aisé et abandonné très rapidement et dont nous ne parlerons pas),

- un interrupteur actionné par l'hélice délivrant des impulsions détectées par un appareillage spécial que nous examinerons en détails par la suite,

- une génératrice de courant continu de précision fournissant aux bornes de l'appareil une tension de 0 à 15 V proportionnelle à la vitesse de rotation de l'hélice.

Les dispositifs de comptage et de signalisation permettent donc de distinguer trois catégories de moulinets : moulinets de première, deuxième et troisième "génération".

Si nous considérons maintenant la technologie et le montage de l'équipage mobile, nous pouvons classer les moulinets en deux types : les moulinets à axe fixe et les moulinets à axe mobile.

Dans le premier type, l'axe est fixé au corps du moulinet. L'hélice montée sur une gaine, tourne autour de l'axe par l'intermédiaire de deux paliers à billes, ou de paliers à faible frottement. La gaine supporte le mécanisme de transmission des signaux : vis sans fin dans le cas de transmission mécanique ou aimant permanent dans le cas de transmission magnétique. (Figure 9)

L'hélice des moulinets du deuxième type est montée directement sur un axe tournant sur des paliers à billes solidaires du corps du moulinet. Le mécanisme de transmission des signaux est placé en bout d'axe : vis sans fin, aimant permanent ou petite pastille isolante. (figure 10)

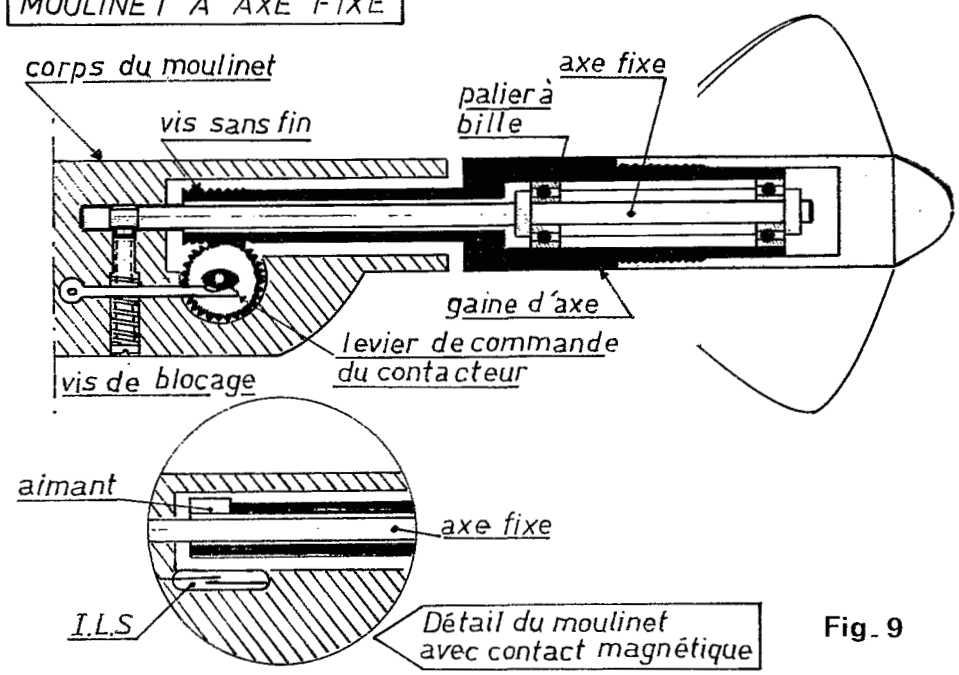

MOULINET A AXE FIXE
corps du moulinet
vis sans fin
palier à bille
axe fixe
gaine d'axe
levier de commande du contacteur
vis de blocage
aimant
axe fixe
I.L.S
Détail du moulinet avec contact magnétique

Fig. 9

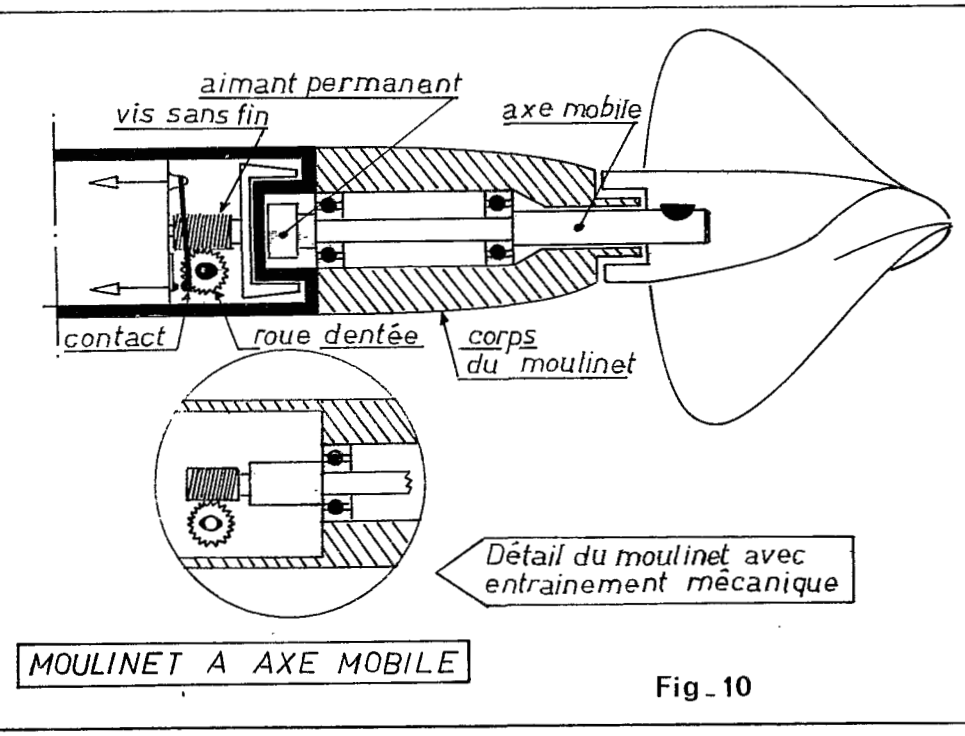

aimant permanant
vis sans fin
axe mobile
contact
roue dentée
corps du moulinet
Détail du moulinet avec entrainement mêcanique
MOULINET A AXE MOBILE

Fig. 10

Les moulinets ont un axe fixe ou un axe mobile avec, soit une transmission mécanique ou magnétique du mouvement de l'hélice au système de détection de la vitesse (interrupteur ou génératrice), soit une commande directe de l'interrupteur par un aimant permanent.

Dans le cas de moulinets de deuxième génération avec axe fixe ou mobile à transmission mécanique, l'interrupteur placé dans une chambre aussi étanche que possible, sous bain d'huile, est actionné par un levier et un système de démultiplication réalisé à l'aide d'une vis sans fin solidaire de la gaine ou de l'axe et d'une roue dentée. Avec ces mêmes moulinets à transmission magnétique, le système de démultiplication et l'interrupteur sont placés dans une chambre étanche. L'aimant fixé en bout d'arbre entraîne en rotation, à travers la paroi de la chambre, une armature mobile solidaire du mécanisme.

Ce système permet par changement du couple vis sans fin-roue dentée , de modifier la cadence des contacts. On obtient ainsi un contact pour 40, 20, 10, 2 ou 1 tours d'hélice.

Avec les moulinets de ce même type, mais à commande directe, sans mécanisme de réduction, l'interrupteur est constitué par un I.L.S. (interrupteur à lames souples) étanche, actionné directement par un aimant logé dans l'axe ou la gaine. On obtient un contact par tour d'hélice.

Il faut noter qu'avec les perfectionnements apportés depuis quelques années aux détecteurs d'impulsions, les constructeurs de moulinets abandonnent de plus en plus la transmission mécanique ou magnétique avec démultiplication et présentent aux usagers des moulinets donnant un contact par tour. On supprime ainsi une cause d'erreurs (car 1 top correspondant toujours à 1 tour) et une source de frottements, d'où amélioration des conditions de fonctionnement.

II.1 2 2. Hélices

II.1 2 2 1. Généralités

Les hélices à rais dont le rotor se compose de plusieurs ailettes reliées au moyeu à l'aide de petites tiges, utilisées sur les tous premiers moulinets ne sont citées ici que pour mémoire.

Les moulinets modernes à axe horizontal sont tous équipés d'hélices à arêtes biaises (dont les pales à surface hélicoïdale sont implantées directement sur le moyeu) normales ou auto-composantes (ces deux tèrmes seront définis par la suite).

On trouve des hélices en laiton chromé usinées, en alliage d'aluminium moulées et depuis quelques années, en plastique moulées. Les avantages présentés par ce dernier matériau sont tels que certains constructeurs ont abandonné les hélices métalliques et ne présentent plus que des hélices plastiques en raison de leur prix de revient plus bas, de la suppression du tarage individuel (les hélices sont étalonnées de façon statistique en choisissant quelques échantillons seulement dans un lot issu du même moule : étalonnage moyen), de leur inertie très faible car la densité est voisine de celle de l'eau et enfin de l'absence de déformation permanente en cas de choc (l'hélice casse mais ne se déforme pas).

Une hélice est caractérisée par son diamètre et son pas. Les diamètres les plus courants sont 125 et 100 mm. Mais on peut descendre jusqu'à 30 mm dans le cas de micromoulinets. Il a été réalisé des moulinets spéciaux[1], destinés à mesurer des vitesses quasi ponctuelles, dont le diamètre de l'hélice était de quelques millimètres. Les petits diamètres sont intéressants lorsque la tranche d'eau dont on veut mesurer la vitesse présente une épaisseur faible.

Le pas d'une hélice est la distance parcourue par le moulinet déplacé en eau calme lorsque l'hélice a fait exactement un tour. Autrement dit, si l'hélice, soumise à un courant fluide, a une vitesse de rotation de 1 tour par seconde, la vitesse en m/s du fluide est égale en première approximation, à la valeur du pas de l'hélice.

---

(1) Laboratoire de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

On distingue le pas nominal caractéristique donnée par le constructeur, et le pas réel obtenu après usinage et défini après étalonnage de l'hélice. La différence entre le pas réel et le pas nominal est due aux imperfections d'usinage.

Les pas nominaux les plus courants sont :

0,05 ; 0,10 ; 0,125 ; 0,25 ; 0,50 ; 1,00 mètre.

Pourquoi les constructeurs utilisent-ils une gamme aussi étendue de pas nominaux ? Il existe deux raisons principales : une hélice à faible pas a une meilleure sensibilité qu'une hélice à grand pas, donc elle tourne plus facilement dans les écoulements présentant des vitesses faibles. Mais une hélice à pas faible placée dans un courant assez fort, donnera avec les moulinets à signalisation électrique, un nombre important d'impulsions par seconde et jusqu'à ces dernières années, les compteurs existants ne pouvaient pas compter plus de 10 ou 20 impulsions par seconde sans risque d'erreur. Pour diminuer le nombre de contacts, les constructeurs ont donc augmenté le pas des hélices.

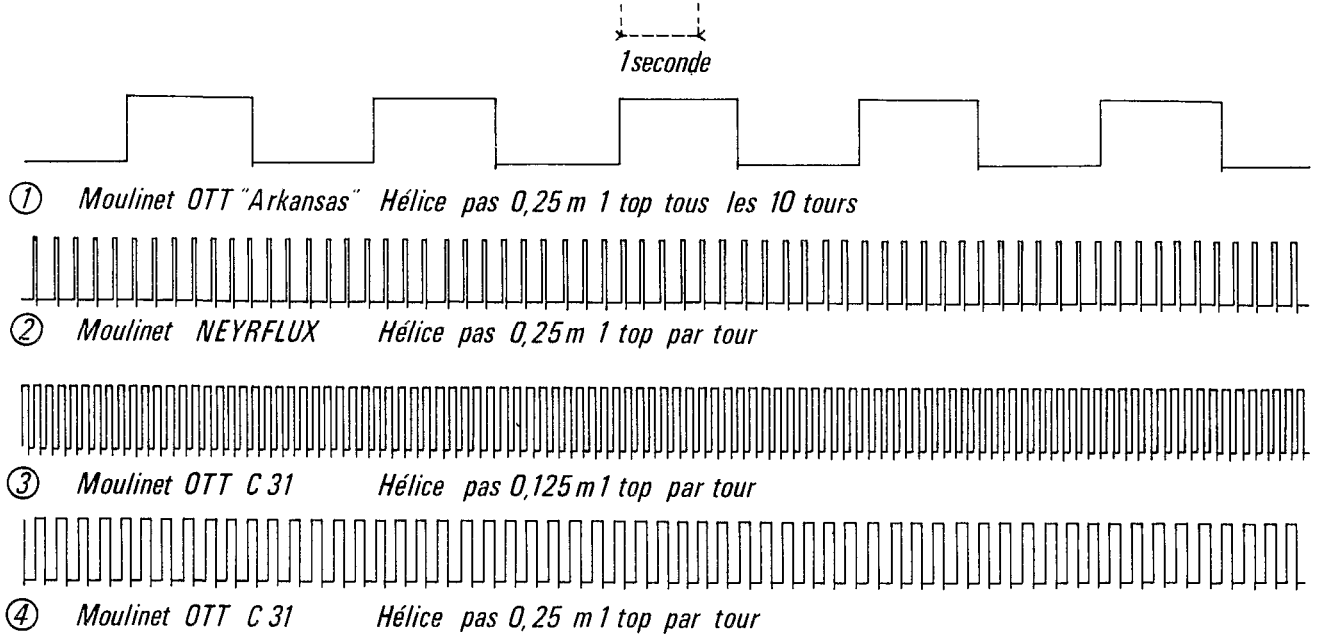
Avec les compteurs électroniques, dont nous parlerons plus loin , cet inconvénient n'existe plus et la même hélice couvrira une plage de vitesse plus étendue.

La figure 11 montre les enregistrements obtenus avec quatre moulinets équipés d'hélices et de mécanismes de transmission différents. Nous rappelons qu'un "top" est constitué par la distance séparant le front f1 de la première impulsion du front f2 de la seconde(fig. 12) Il s'ensuit que pour mesurer N impulsions (N tops) il faut lancer le compteur sur le front f1 et l'arrêter sur le front fn+1 de l'impulsion N + 1. C'est pour cela que lors du comptage manuel, l'opérateur compte zéro au déclenchement du chronomètre sur le front f1 de la première impulsion et arrête à 10 (impulsion N° 11) pour avoir 10 tops.

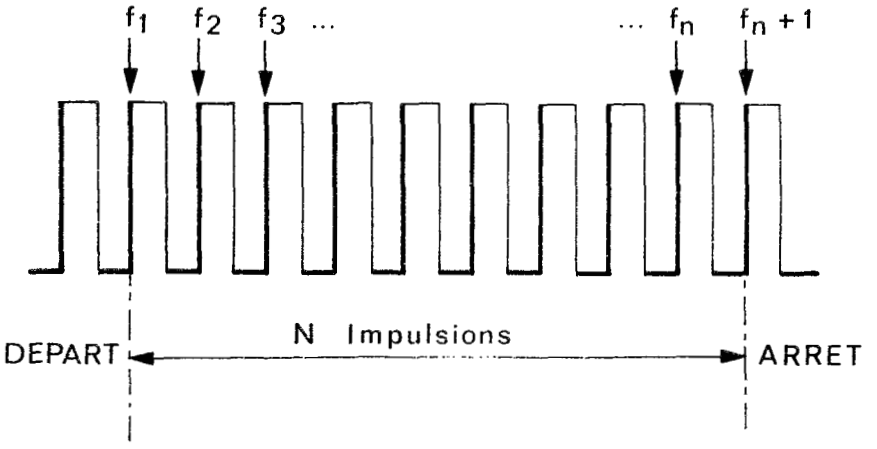
On voit sur la figure que la forme et le nombre d'impulsions diffèrent avec le pas de l'hélice et la cadence d'émission des contacts. La disposition de l'aimant et les caractéristiques des ILS peuvent également modifier la forme des signaux : dissymétriques dans le cas du Neyrflux, pratiquement symétrique avec les C 31 de OTT (égale longueur du silence et du bruit).

Fig - 11

ENREGISTREMENTS DES IMPULSIONS FOURNIES PAR QUATRE MOULINETS PLACÉS DANS LE MÈME ÉCOULEMENT


1seconde
① Moulinet OTT "Arkansas" Hélice pas 0,25 m 1 top tous les 10 tours
② Moulinet NEYRFLUX Hélice pas 0,25 m 1 top par tour
③ Moulinet OTT C 31 Hélice pas 0,125 m 1 top par tour
④ Moulinet OTT C 31 Hélice pas 0,25 m 1 top par tour

Représentation contact moulinet Fig_12



Utilisées avec les moulinets à génératrice de courant, les hélices à pas différents permettent de disposer de plusieurs plages de mesure et d'améliorer ainsi la précision aux faibles vitesses. Cependant, il faut avoir soin de changer l'hélice avant d'atteindre des vitesses de rotation trop élevées (max : 700 t/min) afin d'éviter la saturation de la dynamo.

Il faut noter aussi que les hélices à pas court, du fait de la faible inclinaison de l'arête sur l'axe, présentent un couple moteur peu important : on remédie à cet inconvénient en augmentant la surface sur laquelle s'exerce la poussée hydrodynamique en réalisant des hélices tripales ou à double enroulement.

Dans les premiers moulinets, l'axe tournait entre deux pointes posées sur coussinets de saphir . Très rapidement, on a adopté les roulements à billes de précision et on a cherché à les protéger au maximum contre les entrées d'eau et de sable. Divers montages ont été utilisés ; en général, les paliers à billes tournent dans un bain d'huile fluide. Les échanges huile-eau sont limités par effet de capillarité. Avec l'apparition des hélices en matière plastique, Neyrpic a supprimé les roulements à billes et a réalisé des paliers à faible frottement lubrifiés directement par l'eau (voir moulinet Neyrflux).

II.1.2.2.2. Hélices normales

Ces hélices mesurent correctement la vitesse des filets liquides tant que leur trajectoire est parallèle à l'axe du moulinet ou qu'elle reste dans un angle inférieur à 5° (figure 13).

II.1.2.2.3. Hélices auto-composantes

Dans le cas d'écoulements obliques par rapport à la section de mesure, il s'agit de détecter non les valeurs absolues des vitesses locales v, mais les valeurs de leurs composantes v_o dans la direction perpendiculaire à la section (figure 13).

$$v_o = v \cos \alpha$$

α étant l'angle que fait le vecteur vitesse v avec la perpendiculaire à la section de mesure. C'est la loi des cosinus ou de l'effet auto-composant.

Les résultats de nombreux essais ont montré que, dans un courant oblique, la vitesse v_i calculée à l'aide de la formule d'étalonnage du moulinet est toujours inférieure à la composante axiale réelle v_o. On a :

$$v_i = K_\alpha \; v_o$$

où $K_\alpha = f(\alpha)$ désigne le coefficient d'obliquité d'attaque. On a constaté que l'écart entre la valeur calculée v_i et la valeur réelle v_o croît avec l'angle α et qu'il dépend de la forme de l'hélice. La Société OTT a été la première à mettre au point des hélices (type A et type R) dont les caractéristiques suivent la loi des cosinus dans des limites plus étendues que les hélices à arêtes biaises de construction normale.

Ceci est mis en évidence sur la figure 13 où sont tracées la courbe $v_o/v = \cos \alpha = f(\alpha)$ (trait plein) et les courbes $v_i/v = K_\alpha \cos \alpha = f(\alpha)$ (traits pointillés) pour les hélices normales, A et R.

Fig_13

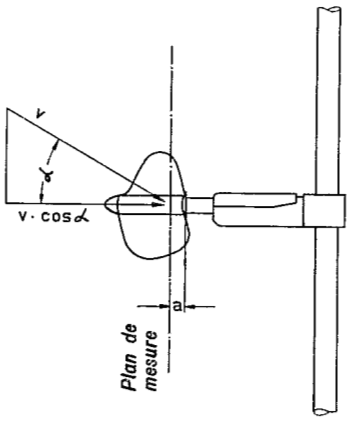


Fig. 1

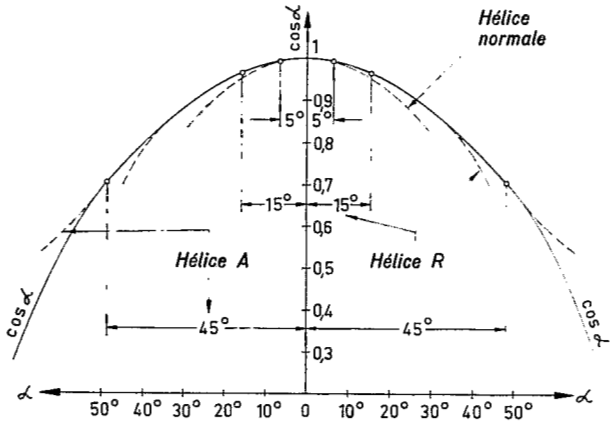


Fig. 2

d'après OTT

Notice HIf1006

Cette figure montre les limites d'utilisation des différentes hélices. Les angles d'incidence maximaux sont de :

- 5° avec l'hélice normale,
- 15 à 25° avec l'hélice R
- 45° avec l'hélice A

L'angle d'incidence ou l'angle de la direction du vecteur vitesse avec l'axe du moulinet, doit rester dans certaines limites qui sont précisées par le constructeur et dont nous parlerons lors de la description détaillée des moulinets.

On distingue deux types d'hélices à arêtes biaises : les hélices normales et les hélices auto-composantes. Les premières donnent des résultats corrects pour des angles d'incidence très faibles (5°), tandis que les secondes donnent avec une bonne approximation la valeur $V \cos \alpha$ *avec des incidences pouvant atteindre 45° suivant les modèles. On abandonne de plus en plus les matériaux traditionnels (laiton chromé, alliages d'aluminium, etc...) en faveur de la matière plastique. Les hélices et les moulinets sont généralement livrés avec un certificat de tarage.*

II.1 2 3. Tarage des moulinets

Tarer ou étalonner un moulinet c'est définir la relation entre la vitesse de l'eau dans laquelle il est plongé et les paramètres qui sont effectivement détectés : nombre de tours N de l'hélice dans un temps T donné avec les moulinets à signalisation électrique ou tension U aux bornes avec les moulinets à génératrice.

Les moulinets sont étalonnés par translation rectiligne dans un canal de dimensions suffisantes où l'eau est parfaitement immobile.

II.1 2 3 1. Moulinets à signalisation électrique

Le principe de fonctionnement du moulinet repose sur la linéarité de la relation entre la vitesse d'écoulement de l'eau et la vitesse de rotation de l'hélice. L'organe mobile mis en mouvement par le fluide actionne un système de signalisation approprié qui permet de compter ou d'enregistrer le nombre de tours effectués N pendant un temps T.

La vitesse d'écoulement est calculée à partir du nombre de tours par seconde : $n = N/T$ de l'hélice et de la formule de tarage du moulinet.

En l'absence de frottements, la relation liant la vitesse V du fluide à la vitesse angulaire de l'hélice serait de la forme : $V = Kn$.

En raison des frottements mécaniques sur l'axe, des pertes hydrauliques diverses, la relation théorique est une hyperbole. Pratiquement, l'expérience montre que l'on peut assimiler cette hyperbole à deux ou plusieurs droites, l'écart étant inférieur à la précision expérimentale. La formule de tarage est donc sensiblement linéaire pour une gamme de vitesses déterminée, et est représentée

Fig_13

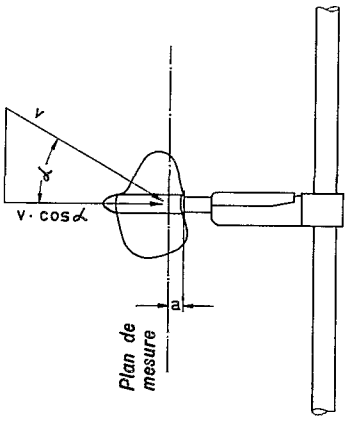


Fig. 1

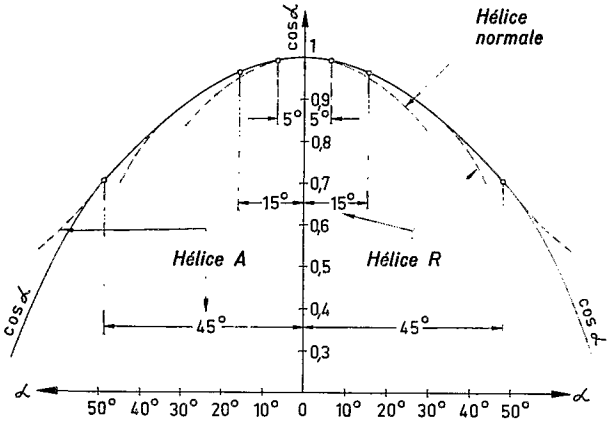


Fig. 2

d'après OTT

Notice HIF1006

Cette figure montre les limites d'utilisation des différentes hélices. Les angles d'incidence maximaux sont de :

- 5° avec l'hélice normale,
- 15 à 25° avec l'hélice R
- 45° avec l'hélice A

L'angle d'incidence ou l'angle de la direction du vecteur vitesse avec l'axe du moulinet, doit rester dans certaines limites qui sont précisées par le constructeur et dont nous parlerons lors de la description détaillée des moulinets.

On distingue deux types d'hélices à arêtes biaises : les hélices normales et les hélices auto-composantes. Les premières donnent des résultats corrects pour des angles d'incidence très faibles (5°), tandis que les secondes donnent avec une bonne approximation la valeur $V \cos \alpha$ *avec des incidences pouvant atteindre 45° suivant les modèles. On abandonne de plus en plus les matériaux traditionnels (laiton chromé, alliages d'aluminium, etc...) en faveur de la matière plastique. Les hélices et les moulinets sont généralement livrés avec un certificat de tarage.*

II.1 2 3. Tarage des moulinets

Tarer ou étalonner un moulinet c'est définir la relation entre la vitesse de l'eau dans laquelle il est plongé et les paramètres qui sont effectivement détectés : nombre de tours N de l'hélice dans un temps T donné avec les moulinets à signalisation électrique ou tension U aux bornes avec les moulinets à génératrice.

Les moulinets sont étalonnés par translation rectiligne dans un canal de dimensions suffisantes où l'eau est parfaitement immobile.

II.1 2 3 1. Moulinets à signalisation électrique

Le principe de fonctionnement du moulinet repose sur la linéarité de la relation entre la vitesse d'écoulement de l'eau et la vitesse de rotation de l'hélice. L'organe mobile mis en mouvement par le fluide actionne un système de signalisation approprié qui permet de compter ou d'enregistrer le nombre de tours effectués N pendant un temps T.

La vitesse d'écoulement est calculée à partir du nombre de tours par seconde : $n = N/T$ de l'hélice et de la formule de tarage du moulinet.

En l'absence de frottements, la relation liant la vitesse V du fluide à la vitesse angulaire de l'hélice serait de la forme : $V = Kn$.

En raison des frottements mécaniques sur l'axe, des pertes hydrauliques diverses, la relation théorique est une hyperbole. Pratiquement, l'expérience montre que l'on peut assimiler cette hyperbole à deux ou plusieurs droites, l'écart étant inférieur à la précision expérimentale. La formule de tarage est donc sensiblement linéaire pour une gamme de vitesses déterminée, et est représentée

par une ou plusieurs droites d'équation :

$$V = a\,n + b$$

V vitesse du courant en mètre par seconde,

n nombre de tours d'hélice par seconde,

a pas réel de l'hélice en mètres,

b vitesse dite de frottement en mètre par seconde ou vitesse de démarrage.

Les coefficients a et b sont déterminés expérimentalement pour chaque appareil.

Les deux moulinets, dont les formules de tarage sont :

$$V = 0{,}2473\,n + 0{,}0075$$

et

$$V = 0{,}2512\,n + 0{,}0082$$

ont tous deux un pas nominal de 0,25 m, avec un pas réel de 0,2473 et 0,2512.

Les constructeurs livrent leurs appareils avec un certificat de tarage sur lequel figure la formule à utiliser pour calculer les vitesses à partir du nombre de tours par seconde. Les moulinets sont étalonnés avec le support prévu pour son utilisation ultérieure.

Rappelons que les hélices modernes en plastique sont livrées avec un étalonnnage moyen valable pour toutes les hélices issues d'un même moule. Les hélices métalliques sont étalonnées individuellement.

La précision des étalonnages est généralement très bonne et la valeur de la vitesse est déterminée à quelques °/₀₀ près. Nous renvoyons les lecteurs intéressés par les méthodes d'étalonnage à la notice HLf 120/14 de OTT dans laquelle les différentes phases de calcul des équations des moulinets sont très clairement expliquées.

II.1 2 3 2. Moulinet à génératrice

Dans ce moulinet, le générateur d'impulsions est remplacé par une dynamo de précision qui fournit une tension continue proportionnelle à la vitesse de rotation de l'hélice. On a :

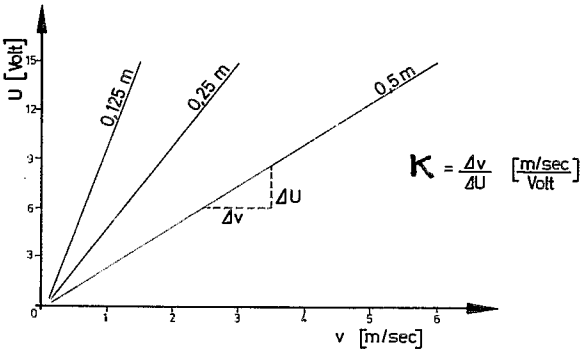
V m/s = K U Volts

La constante K est déterminée pour chaque hélice par étalonnage avec une résistance de sortie de 50 000 Ω.

La Société OTT précise que l'erreur de linéarité entre la vitesse de démarrage du moulinet (variable de 0,035 à 0,045 m/s suivant les hélices) et 0,2 m/s environ ne dépasse pas 1,5 %. A partir de 0,2 m/s la relation entre la tension et la vitesse du courant est linéaire. Pour un moulinet donné, K est valable à partir de 0,2 m/s avec une précision de 0,5 %. Cette constante est très voisine du pas de l'hélice (pour le moulinet N° 18 846 avec hélice en plastique au pas nominal de 0,50 : K = 0,43 , avec hélice en plastique au pas nominal de 0,25 : K = 0,223).

La figure 14 montre quelques courbes de tarage pour différentes hélices.

Fig-14



D'après OTT

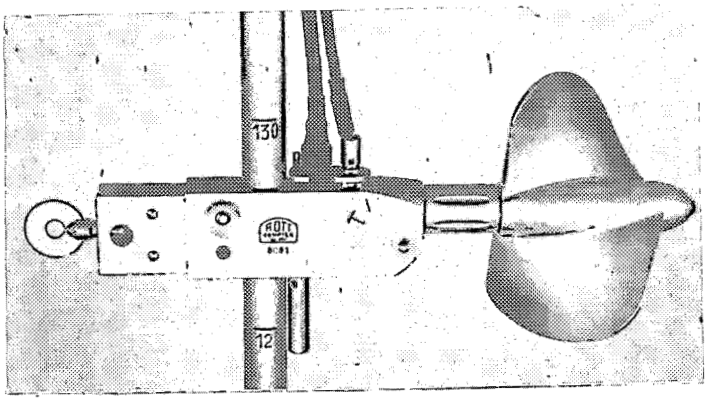
En résumé,

Tous les moulinets, quels que soient leurs types, sont étalonnés en usine avec le support prévu pour leur utilisation ultérieure afin d'établir la relation $Vm/s = a\, n_{t/s} + b$ *ou* $Vm/s = KU$

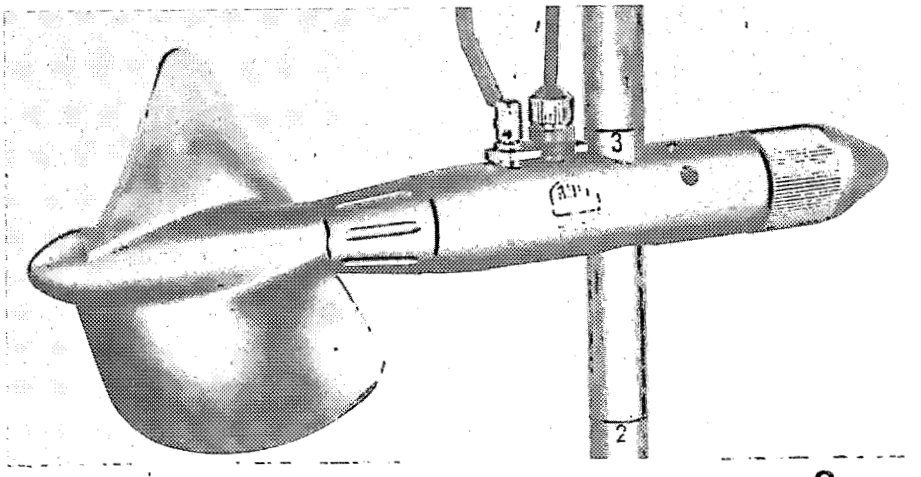
Sur le terrain, ils doivent donc être utilisés avec le montage ayant servi pour l'étalonnage : en effet, il existe des écarts voisins de 2 % entre les vitesses calculées à l'aide des équations de tarage d'un moulinet monté sur perche ou sur saumon. Il est conseillé de procéder à un réétalonnage après 300 heures de service ou un an d'utilisation continue et chaque fois qu'il y a eu risque de modification de la forme de l'hélice.

Planche I

1

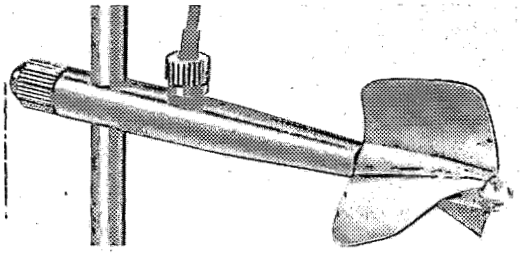


2



3

MOULINETS OTT

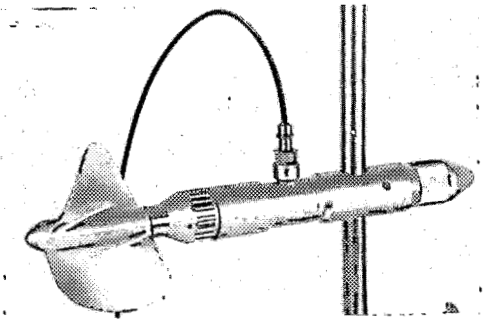


1_ ARKANSAS type V

2_ C 31 type

3 C 1 type

4 à génératrice de courant type 10



4

NOMENCLATURE

MOULINETS NEYRPIC

1 - Moulinet NEYRFLUX sur perche ordinaire de 20 mm

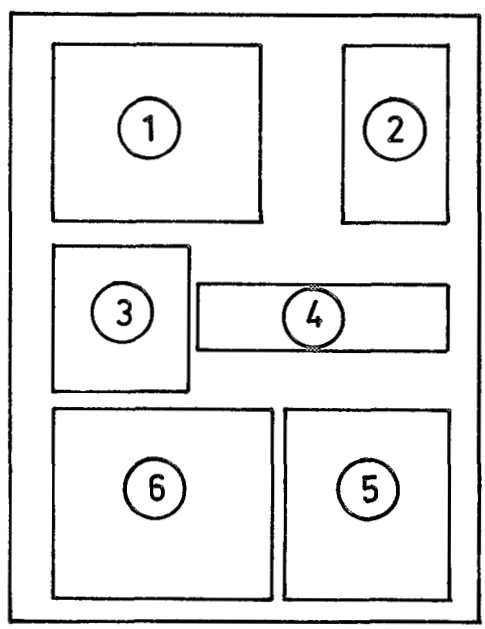
2 - Moulinet NEYRFLUX sur perche coulissante

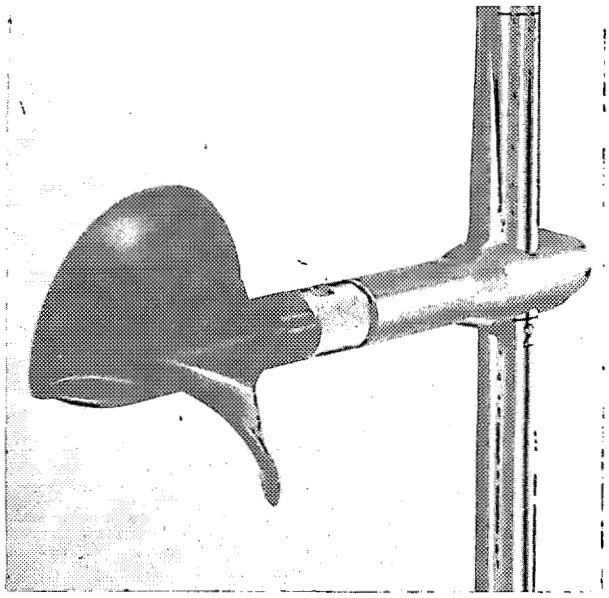
3 - Pièce de fixation du moulinet DUMAS sur saumon

4 - Moulinet DUMAS démonté

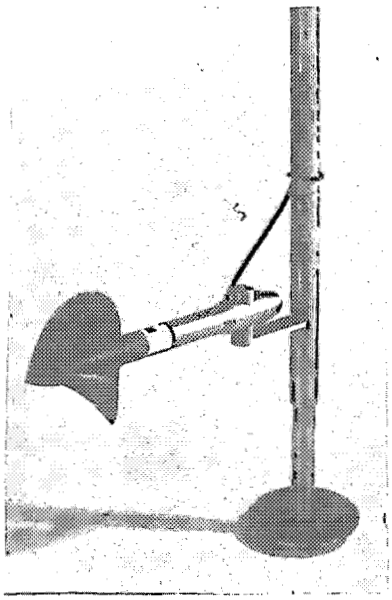
5 - Moulinet DUMAS NEYRPIC

6 - Micromoulinet BEAUVERT



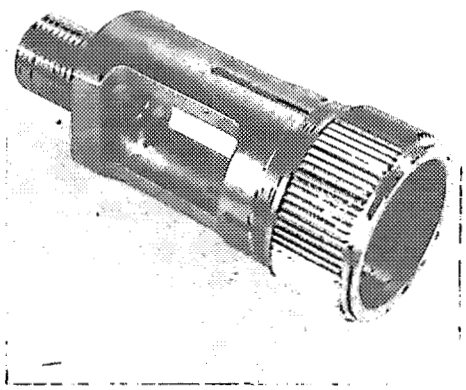


1

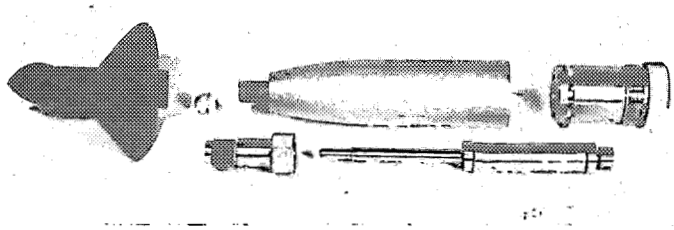


2

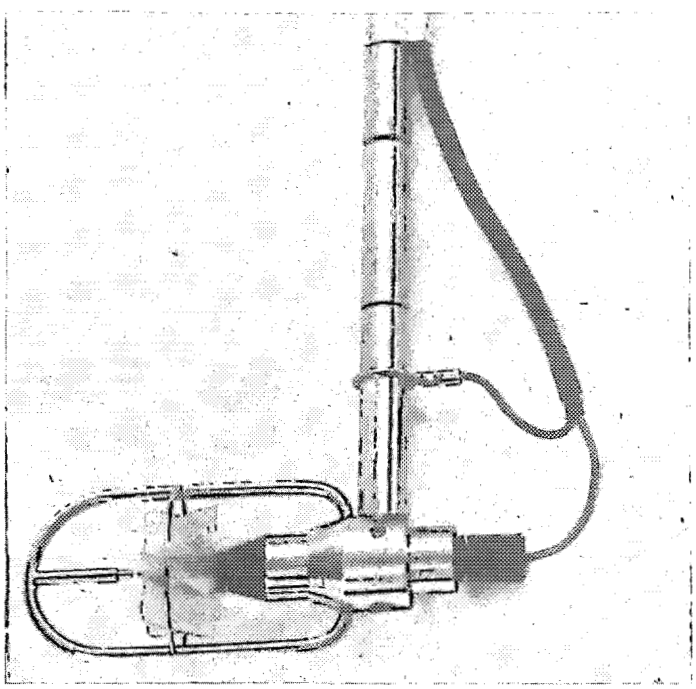
Planche I (suite)



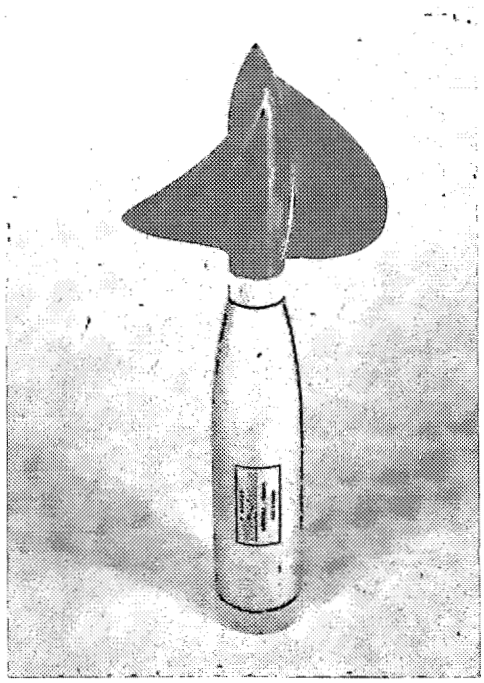
3



4



5



6

II.1 2 4. Quelques moulinets usuels

La planche N° 1 ci-jointe, montre quelques moulinets actuellement les plus utilisés en Europe et en Afrique. Nous donnerons ici le principe de fonctionnement de ces appareils, une liste des principaux appareils avec vue en coupe et nous renverrons le lecteur en annexe pour une description plus détaillée et des consignes d'utilisation et d'entretien.

II.1 2 4 1. Moulinets à générateur d'impulsions

Il faut distinguer trois types de moulinets suivant la technologie du mécanisme générateur d'impulsions :

- mécanisme à entraînement mécanique,
- mécanisme à entraînement magnétique,
- à interrupteurs à lames souples (I.L.S.).

Dans tous ces moulinets, le générateur de signaux ou d'impulsions est un simple interrupteur fermant un circuit électrique à une cadence qui est en relation avec la vitesse du courant à mesurer. Le principe de fonctionnement est schématisé sur la figure 15 .

SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UN MOULINET A SIGNALISATION ELECTRIQUE

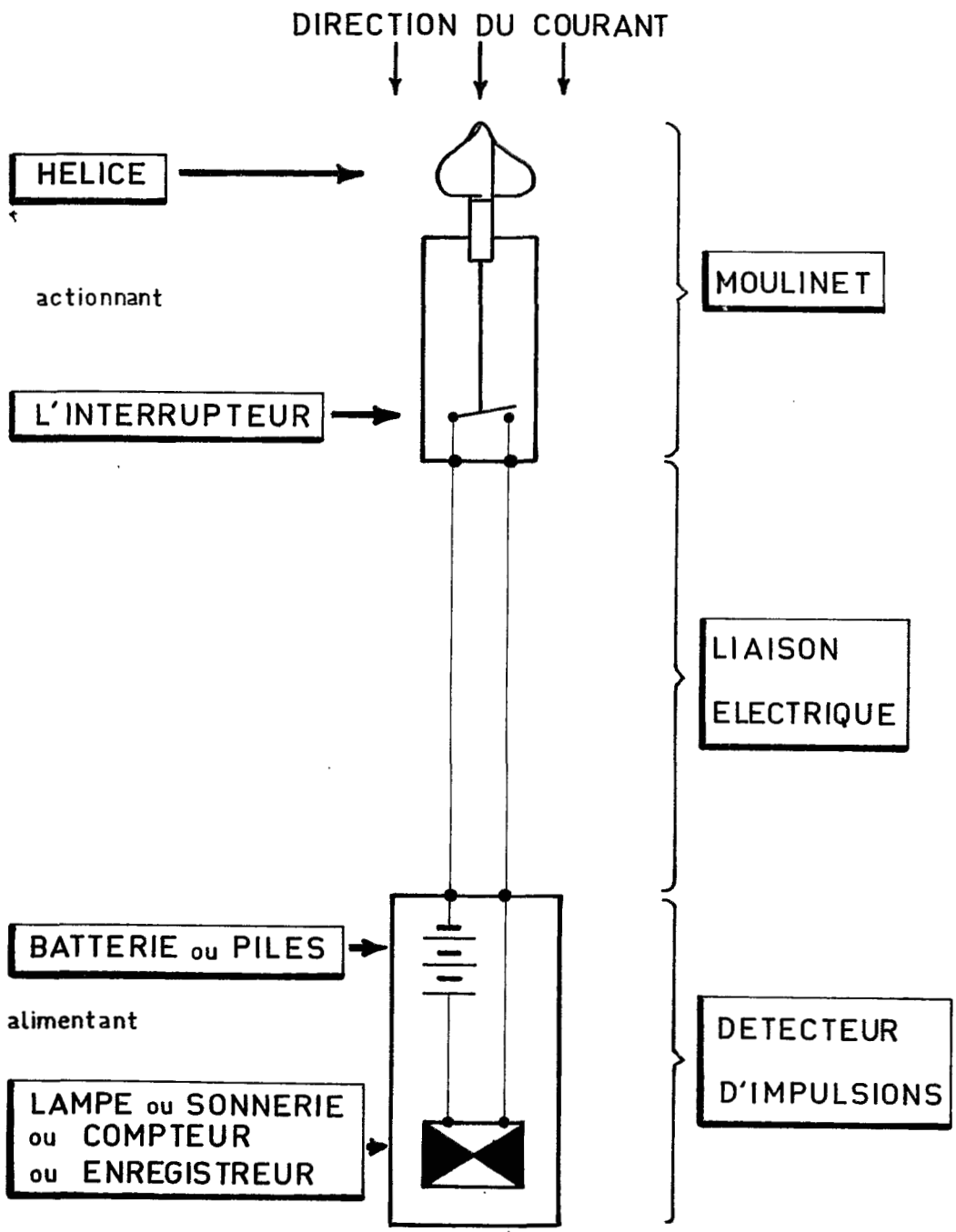


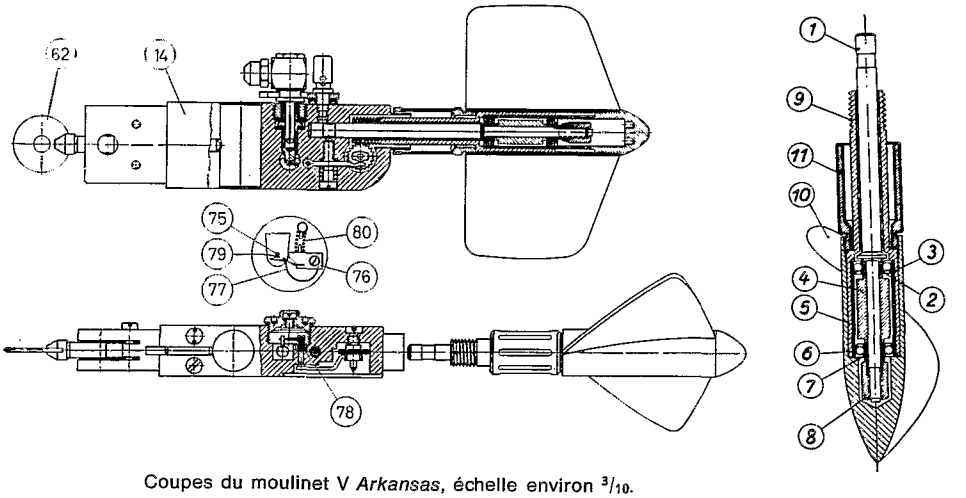
Fig-15

Mécanisme à entraînement mécanique

- Moulinet OTT type V "Arkansas" (10.050)

Le N° 216 de janvier-février 1929 de la "Houille Blanche" décrit dans ses pages d'information, un nouveau moulinet hydrométrique fabriqué par la firme OTT : le moulinet type V. La fabrication est actuellement arrêtée, mais il est encore utilisé dans divers services hydrologiques et il est toujours possible de se procurer les pièces détachées.

La figure 16 montre le moulinet type V en coupe avec son hélice montée et démontée.



Coupes du moulinet V *Arkansas*, échelle environ $^{3}/_{10}$.

1. Axe fixe
2.3.6.7. Roulements et cages
4.5. Entretoises
8. Ecrou
9. Gaine de vis sans fin
10. Hélice
14. Corps du moulinet
62. Vis de blocage sur perche
76. Levier du contact
80. Ressort du contact
77. Lame de contact
75.79. Ergot de contact
78. Axe de liaison avec levier de commande

FIGURE 16

D'après OTT notice HBf 10 050 05

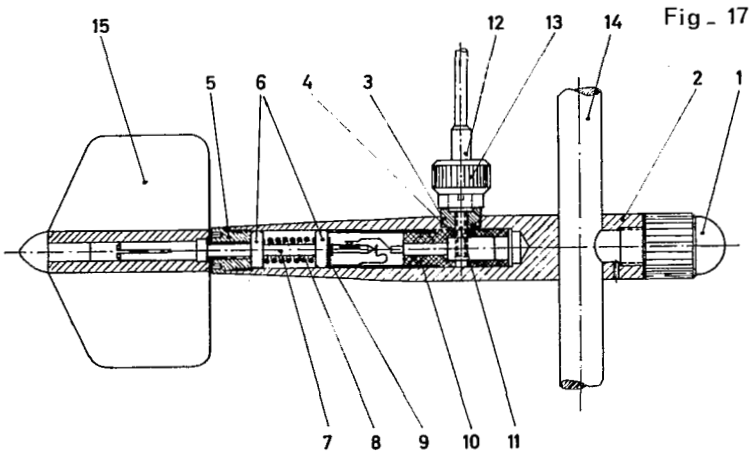
- Moulinet OTT C1 type 10.151

Ce moulinet est classé dans les moulinets à entraînement mécanique bien qu'il n'y ait aucun mécanisme à démultiplication dans le générateur d'impulsions. Ce dernier est constitué simplement par deux balais souples en cuivre frottant en bout d'axe sur lequel est scellée une pastille isolante. On obtient un contact par tour.

La figure 17 montre la coupe de ce moulinet.

A. OTT KEMPTEN | Small Current Meter 10.150 | 111-103 Ae

Fig. 17



1	Pièce de blocage	6	Paliers à billes
2	Corps du moulinet	7	Arbre
3	Raccord	8	Ressort de pression
4	Bague O	9	Rondelle de fixation
5	Bouchon à vis	10	Dispositif de contact

11 Vis de contact

12 Câble du moulinet

13 Ecrou moleté

14 Tige du moulinet

15 Hélice

D'après OTT notice 11103 Ab

Mécanisme à entraînement magnétique

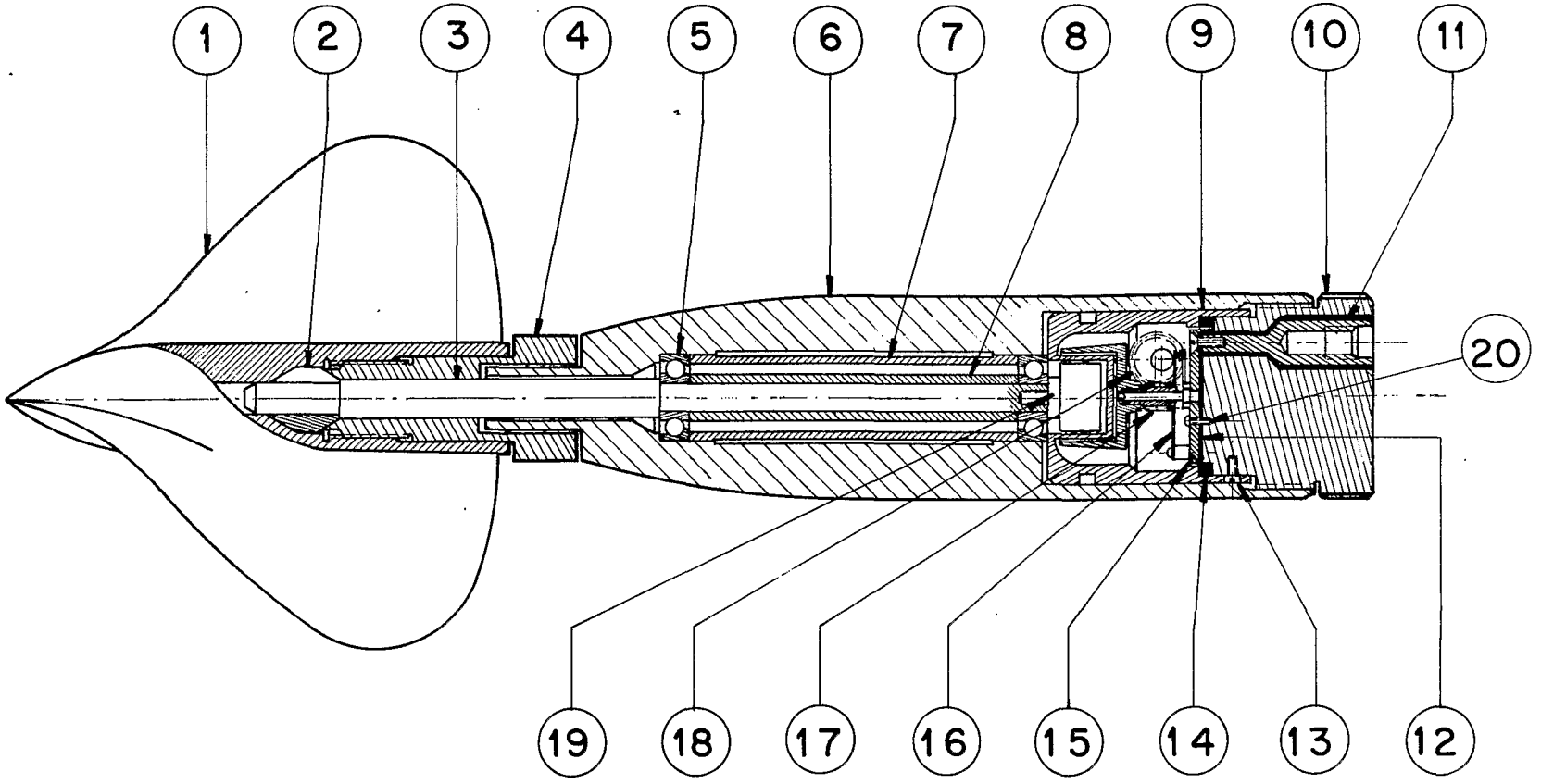
- Moulinet DUMAS-NEYRPIC 2113 AA

Nous ne parlerons que de la version actuelle du moulinet DUMAS-NEYRPIC, version très nettement améliorée vers 1960, simplifiée et plus robuste des premiers moulinets DUMAS-NEYRPIC que l'on trouvait sur le marché en 1950.

Ce moulinet est livré à la demande du client avec un mécanisme à réduction avec entraînement magnétique (réf. 2113 AA) ou avec un contact à I.L.S. (réf. 2114 AA). La présentation est toujours la même : le changement du système de contact est très rapide grâce à des culots étanches parfaitement interchangeables qui se vissent à l'arrière du corps du moulinet.

La figure 18 montre une coupe du moulinet DUMAS-NEYRPIC avec culot à contact mécanique.

MOULINET DUMAS-NEYRPIC Réf. 2113 AA



1. Hélice
2. Bicône de blocage
3. Axe mobile
4. Douille de centrage
5. Roulements
6. Corps

7.8. Entretoises (une seule (7) sur les derniers modèles)
9. Cloche
10. Culot
11. Borne femelle
12. Isolant
13. Vis de retenue de la cloche

14. Joint
15. Platine
16. Lamelles de contact
17. Vis sans fin
18. Roue dentée
19. Aimant

FIGURE 18

D'après NEYRPIC Notice E 2113/K

A interrupteurs à lames souples

Ce type de générateur d'impulsions tend de plus en plus à remplacer les générateurs à mécanismes à réduction par vis sans fin et pignon denté. Ils présentent les avantages suivants : absence de frottements, interrupteur parfaitement étanche dans une capsule scellée sous vide; ils ne donnent qu'un seul contact par tour d'hélice.

- Moulinet OTT C31 (10.002)

Ce moulinet a remplacé le moulinet type V. La figure 19 montre une coupe de cet appareil.

- Moulinet OTT C2 (10.150)

Ce moulinet est une version améliorée du petit moulinet de laboratoire C1. La figure 20 montre une coupe de cet appareil.

- Moulinet DUMAS-NEYRPIC (Réf. 2114 AA)

Ce moulinet est identique au moulinet 2113 AA déjà décrit. Seul le culot qui se visse à l'arrière est différent : à la place du mécanisme de contact à réduction, on a mis un interrupteur à lame souple étanche commandé par l'aimant placé en bout de l'arbre. On obtient un contact à chaque tour d'hélice.

- Moulinet NEYRFLUX

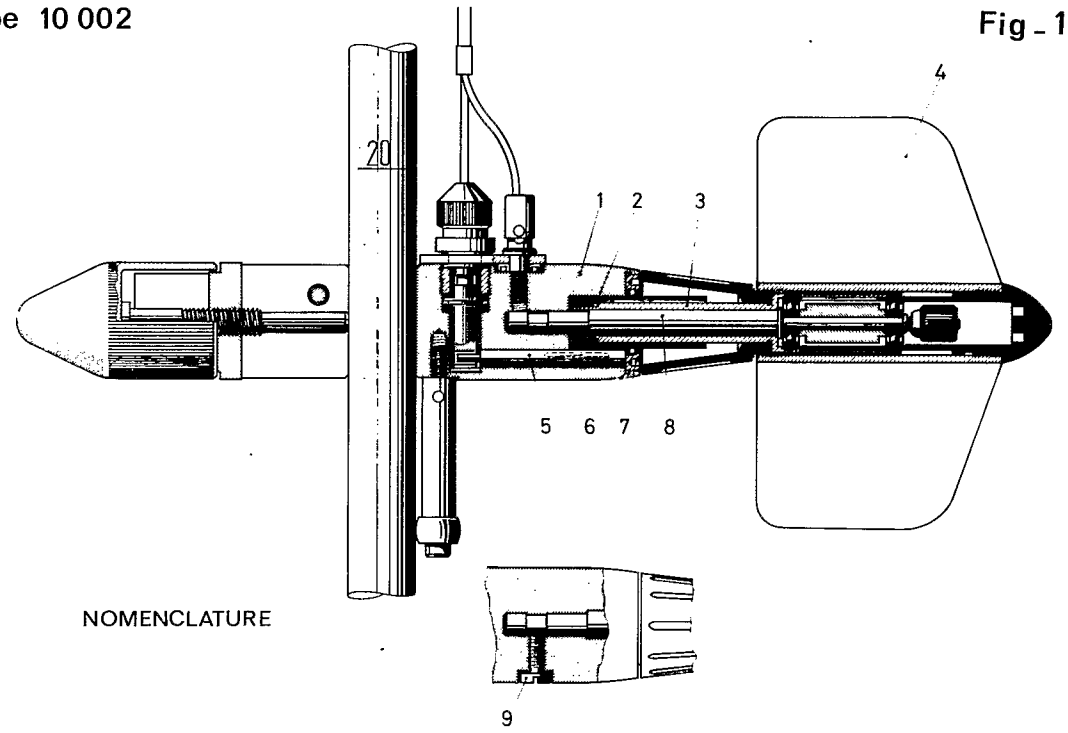
Cet appareil a été lancé sur le marché vers 1969 par la Société NEYRPIC. C'est un moulinet simple et robuste, ne nécessitant qu'un entretien très réduit et dont les performances sont très honorables : un récent essai comparatif de différents moulinets organisé par l'OMM a montré qu'il a une meilleure vitesse de démarrage que les moulinets ayant fait l'objet du même essai.

La figure 21 montre une coupe de cet appareil.

MOULINET OTT

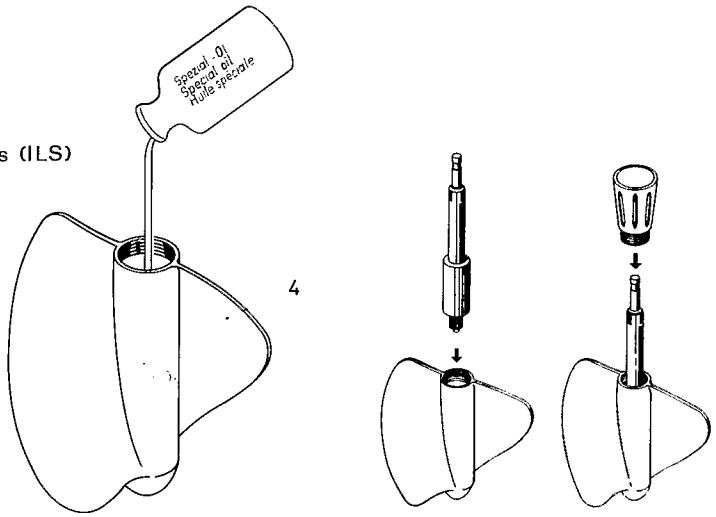
C 31 type 10 002

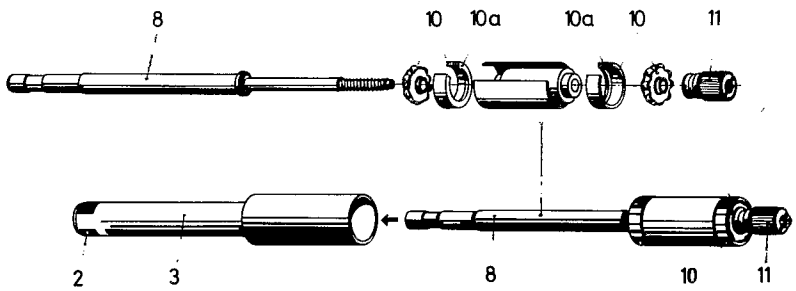
Fig _ 19



NOMENCLATURE

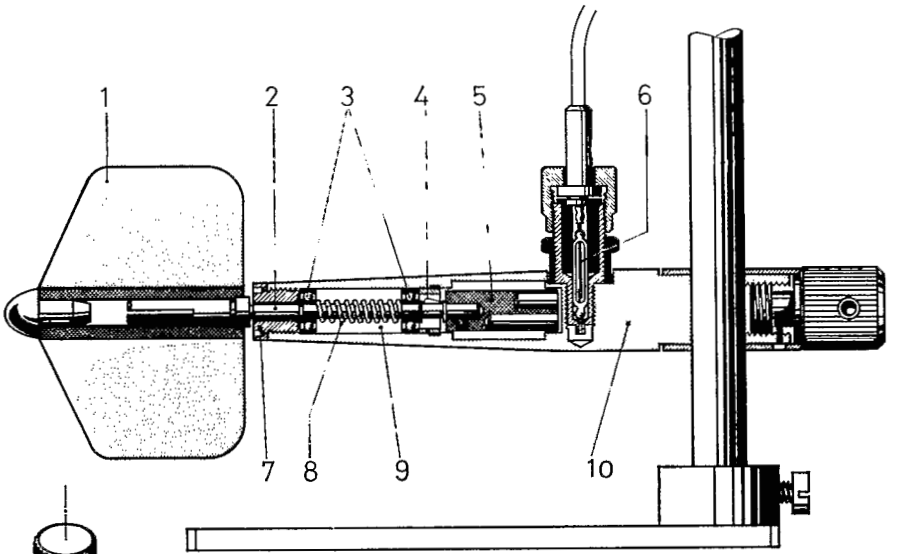
1 _ Corps du moulinet
2 _ Aimant de commande
3 _ Gaine d'axe
4 _ Hélice
5 _ Emetteur d'impulsions (ILS)
6 _ Joint torique
7 _ Bouchon fileté
8 _ Axe fixe
9 _ Vis de blocage
10 _ Roulements à bille
11 _ Ecrou

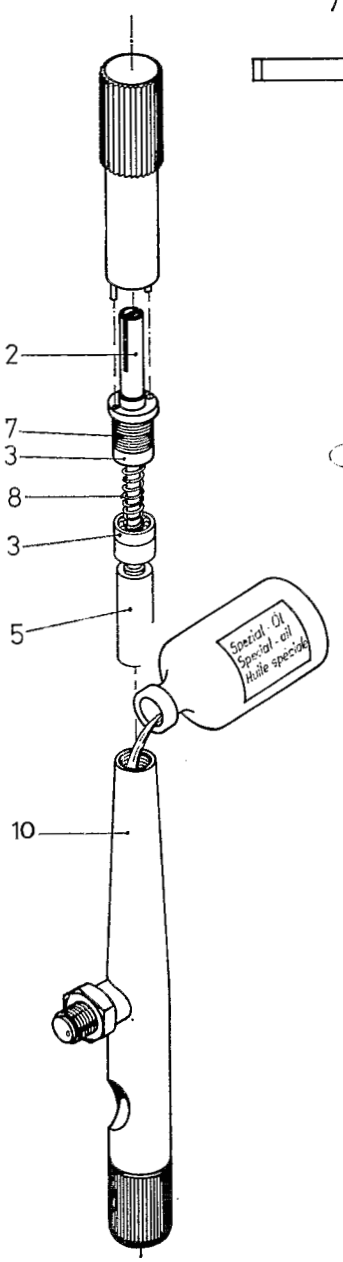


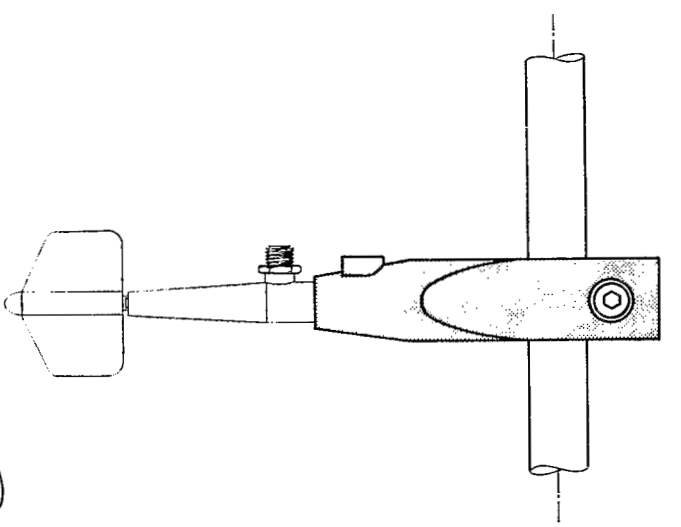


MOULINET OTT C2

Fig - 20



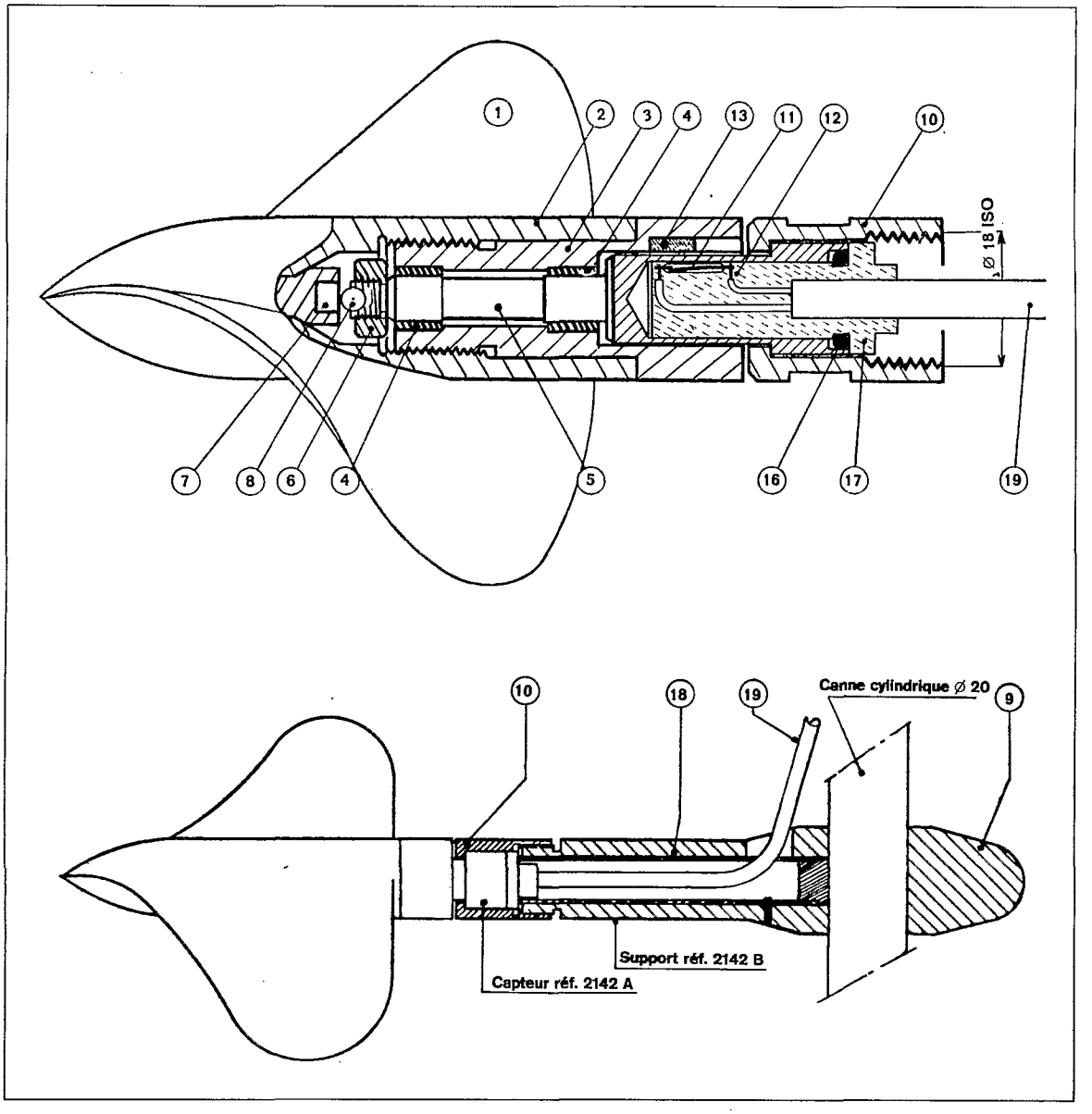




1	Hélice	6	ILS
2	Axe mobile	7	Ecrou d'arrêt
3	Roulements	8	Ressort
4	Circlips	9	Chambre avec huile
5	Manchon avec aimant	10	Corps

D'après OTT

MOULINET NEYRFLUX



1. Hélice
2. Moyeu de l'hélice
3. Douille
4. Paliers
5. Axe fixe
6. Ecrou
7. Grain de frottement
8. Bille
9. Corps
10. Ecrou de vixation
11. ILS
12. Raccord électrique
13. Aimant
16. Joint
17. Culot étanche
19. Câble

FIGURE 21

D'après NEYRPIC Notice M 2142/b

II. 1 2 4 2. Moulinets à génératrice de courant

A notre connaissance, il n'existe actuellement qu'un seul moulinet de ce type sur le marché européen. C'est le moulinet type 10300 fabriqué par la firme OTT.

La figure 22 montre la coupe de cet appareil.

II.1 2 4 3. Autres moulinets à hélice

Nous venons de décrire sommairement les moulinets fabriqués par OTT en Allemagne et NEYRPIC en France,utilisés le plus couramment.

Nous n'avons pas décrit le micromoulinet Beauvert type 71 de Neyrpic car cet appareil est uniquement utilisé en laboratoire.

Il existe d'autres constructeurs en Europe Occidentale : Société SIAP en Italie et Société I.S.M.A. à Forbach (France).

Les modèles proposés par ces firmes sont basés sur les mêmes principes que ceux décrits ci-dessus.

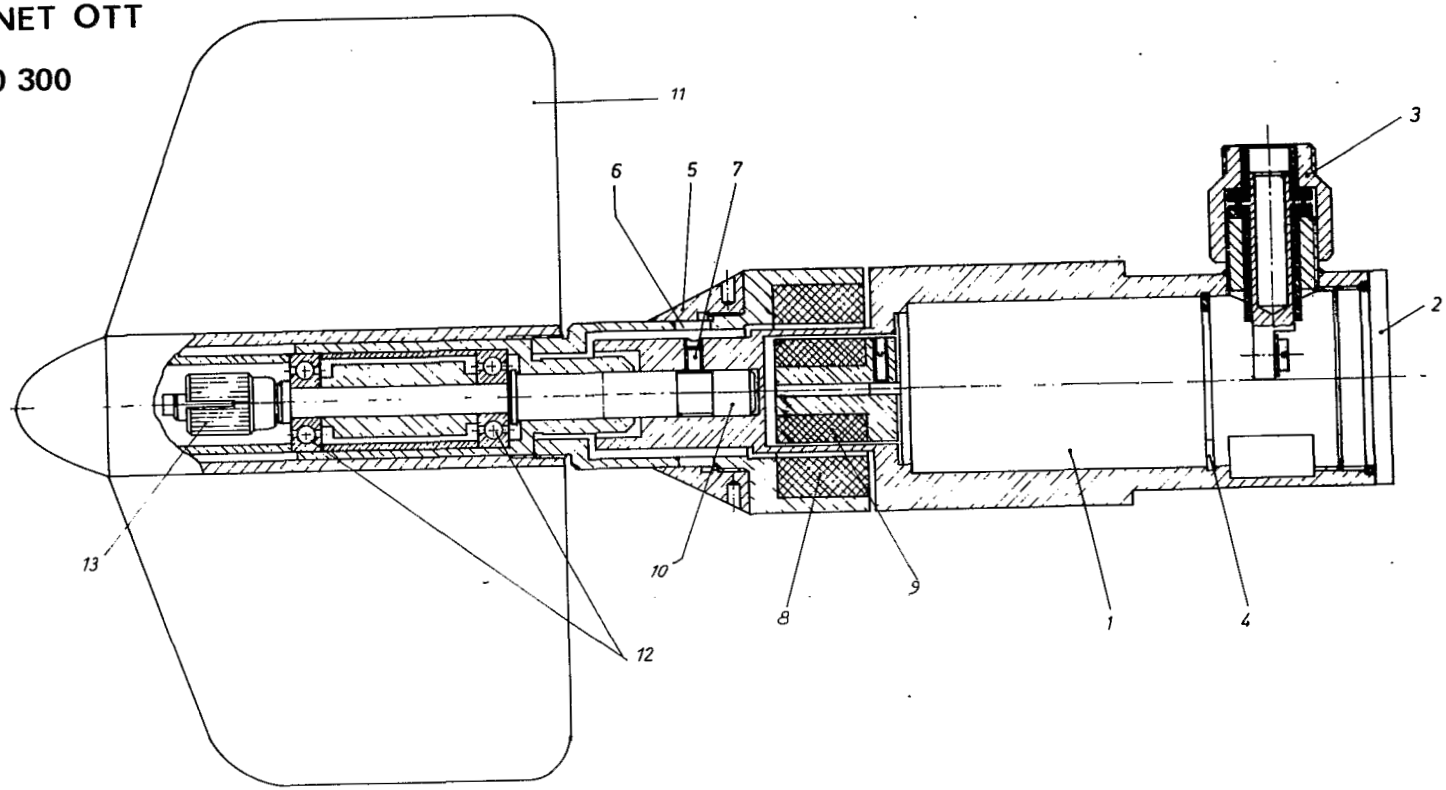
En résumé,

Le moulinet avec son hélice et son générateur d'impulsions ou de courant est le premier maillon de la chaîne de mesure : il fournit un signal (impulsions ou courant) dont la grandeur (fréquence ou tension) est fonction de la vitesse à mesurer. Le second maillon est le dispositif de détection ou d'enregistrement de ce signal.

Fig_22

MOULINET OTT

Type 10 300



1	Génératrice	6	Douille d'hélice et ouvertures de démontage	11	Hélice
2	Fond fileté	7	Vis de blocage de l'axe	12	Roulements
3	Borne étanche	8	Aimant permanent	13	Ecrou
4	Circlip	9	Equipage mobile		
5	Anneau de garde	10	Axe fixe		

D'après OTT

Werkstoff	Bemerkung
Maßstab	2:1
Zeichnung-Nr.	AZ 10C – 609
	Dauermessflügel

II. 1. 3. LES DISPOSITIFS DE DÉTECTION DU SIGNAL

On distingue les détecteurs d'impulsions pour les moulinets à signalisation électrique et les voltmètres à lecture directe ou enregistreurs pour les moulinets à génératrice de courant

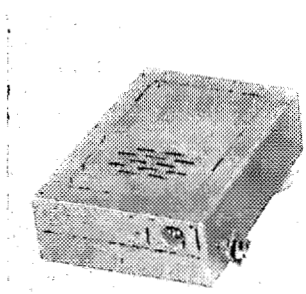
II.1 3 1. Pour moulinets à signalisation électrique

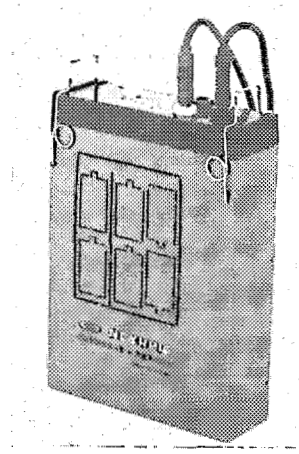
II.1 3 1 1. Couineurs

Avec les premiers moulinets à générateur d'impulsions avec mécanisme à réduction, le nombre de tops (1 top = 10, 20 ou 40 tours suivant la roue dentée) est compté à l'aide d'un détecteur sonore ou lumineux appelé "couineur". Il comporte en général un vibreur ou une lampe électrique mis sous tension par la fermeture du contact. La Société OTT et les Etablissements Neyrpic ont commercialisé des détecteurs de ce type qui sont représentés sur la planche II.

DETECTEURS D'IMPULSIONS

OTT F 2





NEYRPIC Ref. 2233 A

Planche II

II.1 3 1 2. Compteurs mécaniques

Les constructeurs de matériel hydrométrique ont rapidement reconnu qu'il est fastidieux de compter mentalement jusqu'à 10 ou 20 pendant toute la durée d'un jaugeage et que, de plus, c'est une source fréquente d'erreurs. Avec les moulinets donnant un contact tous les tours d'hélice, il n'est plus possible d'utiliser les détecteurs d'impulsion par voie auditive ou visuelle.

L'apparition sur le marché de compteurs digitaux (à chiffres sauteurs) avec remise à zéro, fonctionnant sur piles, a permis la réalisation de détecteurs d'impulsions plus perfectionnés et plus fiables.

La planche N° III montre les appareils mis sur le marché par les firmes OTT et NEYRPIC. Tous ces compteurs sont utilisés avec les moulinets délivrant un contact par tour (1 top = 1tour).

On distingue trois types d'appareils :

- Appareils totalisateurs (F4 et 2251 B) comportant un compteur à trois décades avec remise à zéro alimenté par des piles rondes de 1,5 V. Le temps est mesuré à l'aide d'un chronomètre. Il faut veiller à bien synchroniser le départ et l'arrêt du compteur et du chronomètre de façon à minimiser les erreurs. La fréquence maximale admissible et de 10 impulsions par seconde.

- Appareil à chronomètre incorporé (F6 et 2264 BA). Pour éliminer les erreurs dues au manque de synchronisation du départ et de l'arrêt du compteur et du chronomètre, les constructeurs ont mis au point des appareils dans lesquels un levier ou un commutateur rotatif mettent en route simultanément les deux appareils. Sur l'appareil F6 de OTT un vibreur est mis en service pour la détection du fond à partir d'un contact de fond. Un inverseur permet d'utiliser le vibreur en cas de défaillance du compteur. La cadence maximale acceptable par ces appareils est de 10 impulsions par seconde.

- Appareils à présélection. Il existe trois possibilités :

. Présélection d'un temps de mesure fixe : 30 et 60 secondes ou 50 et 100 secondes. Le compteur est automatiquement arrêté lorsque ce temps est écoulé. On lit directement le nombre de tours effectués par l'hélice : compteur Z41 de OTT.

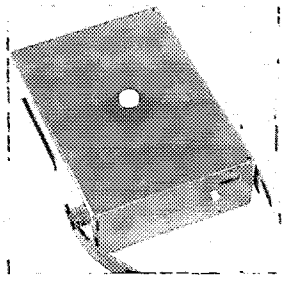
. Présélection soit du temps de mesure, soit du nombre de tops, à préciser à la commande : compteur Z 100 de OTT. Alimentation par 6 piles rondes de 1,5 V. Fréquence maximale admissible 20 impulsions par seconde. Le temps est présélectionné en secondes et 1/10.

. Présélection soit du temps soit des tops grâce à un inverseur placé sur l'appareil : 2266 A de Neyrpic. Ce récepteur compte de manière semi-automatique, soit le nombre d'impulsions émises par le moulinet pendant un temps donné, soit le temps nécessaire pour recevoir un nombre donné d'impulsions. Dans les deux cas, la mesure s'arrête automatiquement lorsque le temps choisi est écoulé ou lorsque le nombre de tops présélectionné a été compté. Dans les deux cas le compteur garde en mémoire le nombre choisi : pour une nouvelle mesure, il suffit de réarmer ce compteur et de mettre à zéro le compteur de mesure.

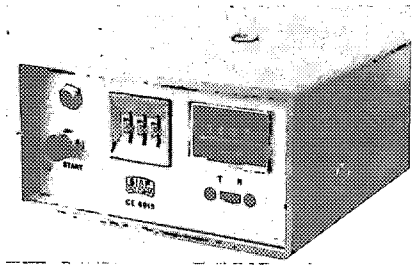
La fréquence maximale est également de l'ordre de 20 impulsions par seconde.

Tous ces appareils à présélection ne sont utilisables que pour les jaugeages point par point.

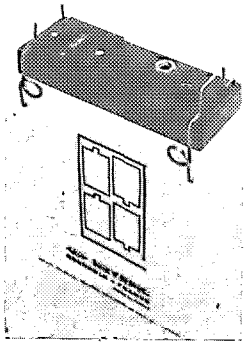
APPAREILS DE COMPTAGE



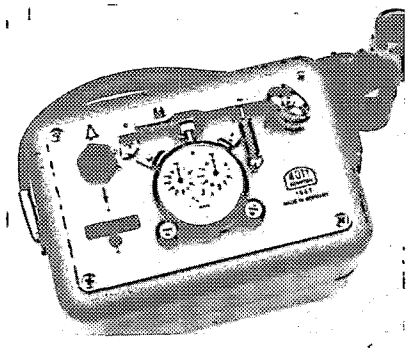
F 4



Compteur à préselection SIAP

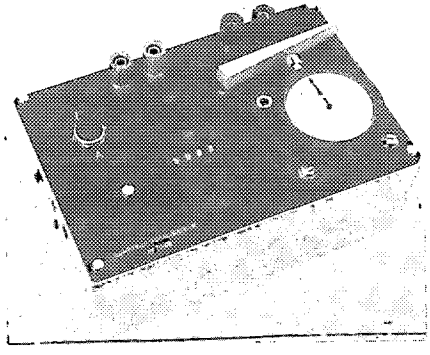


Totalisateur Ref. 2251 B1

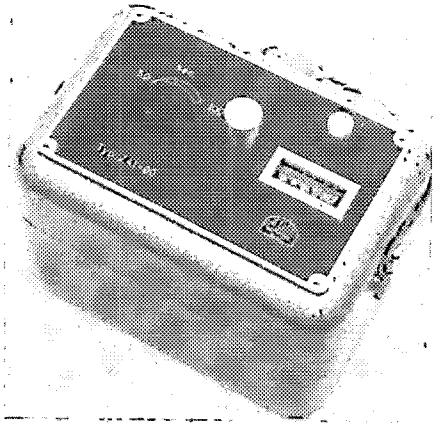


F 6

Récepteurs NEYRPIC

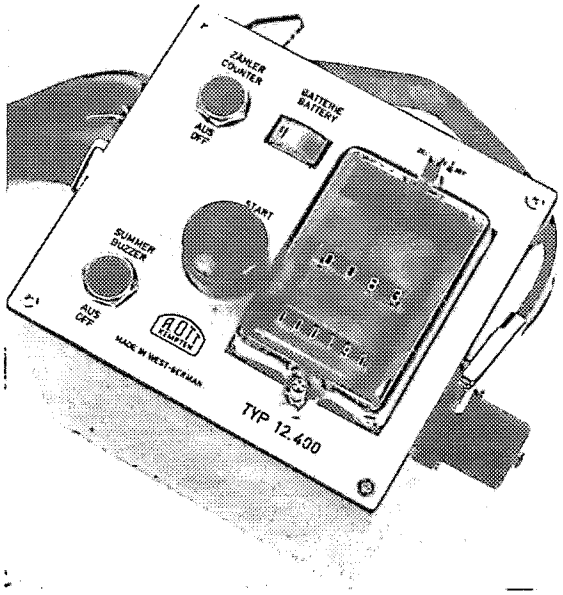


Chrono compteur Ref. 2264 BA



Z 41

A. OTT



Z 100

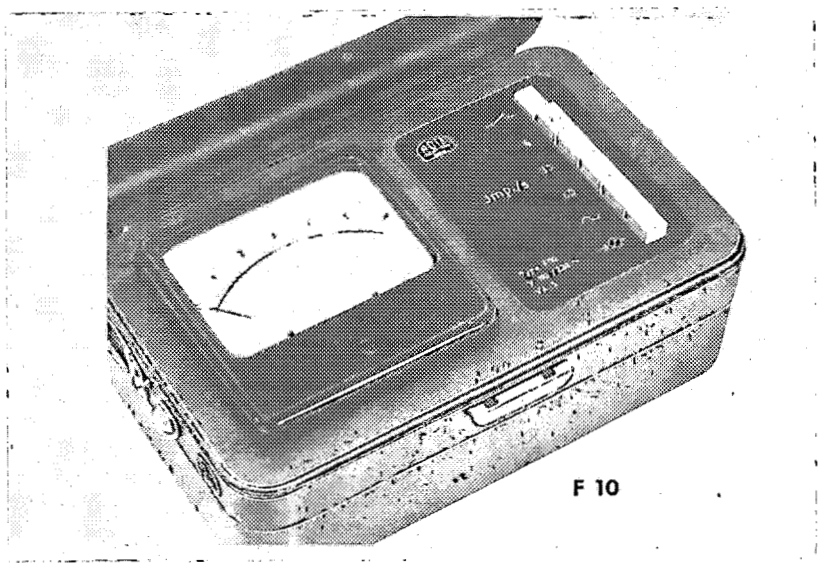
. Appareils spéciaux - La Société OTT fabrique deux appareils, F10 et Z81, représentés sur la planche N° IV.

Le premier donne directement la fréquence des impulsions par lecture sur la graduation d'un voltmètre, la fréquence ayant été au préalable transformée en tension. L'appareil comporte trois sensibilités : pleine déviation pour 6, 30 ou 60 imp./seconde. L'alimentation se fait par une batterie rechargeable sur le secteur (chargeur incorporé). Le deuxième est utilisé pour les jaugeages par intégration. L'appareil totalise simultanément sur trois compteurs à chiffres sauteurs le nombre de tours du moulinet pendant sa descente à vitesse constante, la durée de la mesure et la profondeur. Tous les compteurs sont automatiquement arrêtés par la fermeture du contact de fond.

Ces deux appareils sont, nous semble-t-il, assez peu utilisés.

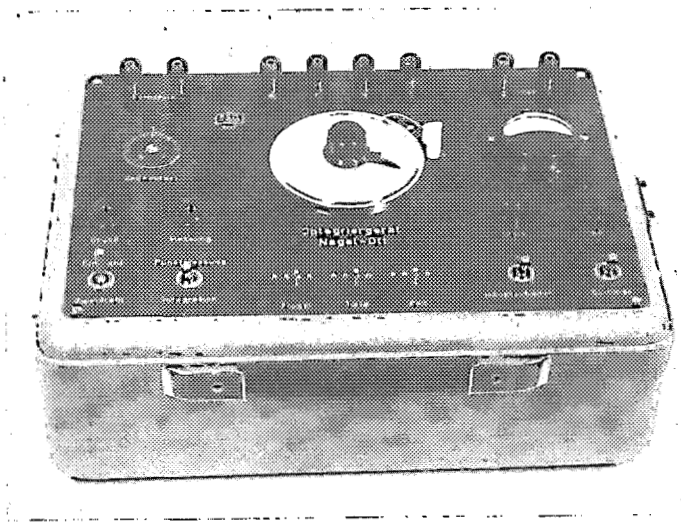
Planche IV

Indicateur de vitesse de rotation - F 10 -



F 10

Intégrateur Z 81 (Appareil Nagel - Ott)



146134

II.1 3 1 3. Compteurs électroniques

Le Laboratoire d'Hydraulique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse a mis au point, pour son Service Essais Extérieurs, un récepteur électronique capable de compter les impulsions délivrées par 10 moulinets.

L'appareil permet de présélectionner pour chaque moulinet, soit le nombre de tops à mesurer, soit le temps pendant lequel doit durer la mesure.

Sur le même principe, mais compte tenu des exigences des hydrométristes de terrain, il a été mis au point deux compteurs électroniques d'impulsions portatifs et autonomes, ne comportant aucune pièce mécanique : le temps est mesuré par des horloges électroniques pilotées par quartz, le compteur est constitué par un système à affichage par diodes électroluminescentes.

L'alimentation se fait par batterie au cadmium nickel, rechargeable sur le secteur à l'aide d'un chargeur incorporé.

Sur le même principe, deux nouveaux appareils sont actuellement à l'essai. Ils fonctionnement sur piles et ont une autonomie de 250 heures de marche discontinue. L'affichage est réalisé sur des blocs numériques à 7 segments au G_a A_s P identiques à ceux des calculatrices de poche. Le premier modèle (CJR 20) dispose d'une présélection du temps fixe 30 ou 60 secondes, avec possibilité de mise hors circuit de cette présélection pour mesurer pendant un temps quelconque avec un chronomètre.

Le second modèle (CJR 22) permet de présélectionner un temps quelconque. Cette présélection peut être mise hors circuit pour les mesures par intégration, par exemple,le temps est compté par l'horloge interne et affiché sur le cadran. La masse de ces appareils est de l'ordre de 435 g pour le premier et 550 g pour le second. Leur épaisseur est de 20 mm.

La planche N° V montre les divers compteurs électroniques.

Planche V

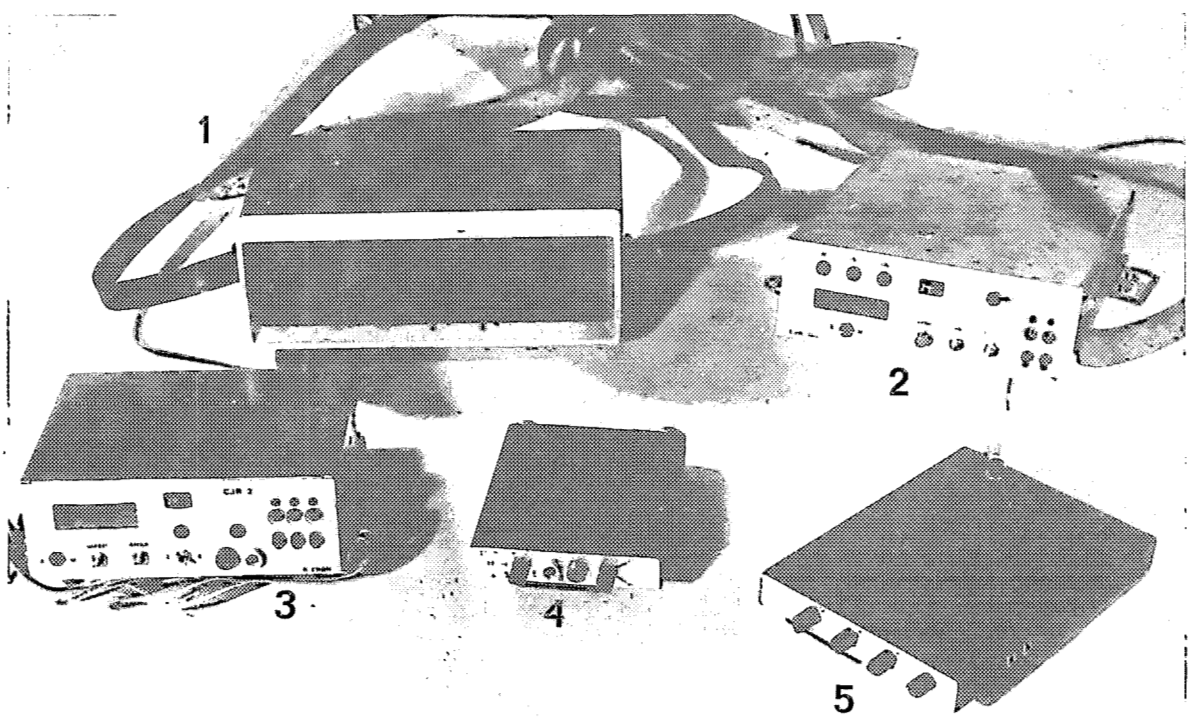
1_ CJR I à présélection (T ou N)

2_ CJR 100 point par point et par intégration

3_ CJR 2 à présélection(T ou N)

4_ CJR 20 durée fixe

5_ CJR 22 à présélection (T)



COMPTEURS ELECTRONIQUES

En annexe, nous donnons quelques remarques générales au sujet de tous ces compteurs ainsi que les références des notices des constructeurs.

Rappelons que les compteurs à présélection de temps à trois décades (secondes et 1/10) permettent d'obtenir rapidement la vitesse du courant directement à partir de la formule de tarage du moulinet : $v = a\ n + b$. Il suffit pour cela d'afficher un temps égal à : 100, 200 ou 500 fois a (suivant la valeur de a, pas réel de l'hélice, afin d'obtenir un temps de comptage suffisant). Le nombre de tours mesuré divisé par 100, 200 ou 500 donnera la vitesse du courant après avoir ajouté la constante b.

Pour un moulinet d'équation :

$$V = 0{,}4957\ n + 0{,}0017$$

on affichera T = 49,6 secondes.

Si on obtient 124 tours, la vitesse sera :

$$V = \frac{124}{100} + 0{,}0017 = 1{,}2417 \sim 1{,}242 \text{ m/s}$$

Si le moulinet a pour équation :

$$v = 0{,}1050\ n + 0{,}039$$

on affichera $T = 0{,}1050 \times 500 = 52{,}5$ secondes.

Si on obtient 145 tours, la vitesse sera :

$$v = \frac{145}{500} + 0{,}039 = 0{,}29 + 0{,}039 = 0{,}329 \text{ m/s.}$$

Dans le cas de moulinets à plusieurs équations de tarage on présélectionne un temps T = 100 a, a étant la constante qui a le plus de chances d'être utilisée compte tenu de la vitesse du courant. Pour les vitesses faibles, la valeur de V sera obtenue en calculant le nombre de tours et en le portant dans l'équation convenable.

Les constructeurs ont amélioré progressivement les détecteurs d'impulsions afin de réduire les risques d'erreur humaine. Les opérateurs sur le terrain doivent s'attacher à utiliser au mieux les performances de ces appareils pour en tirer profit au maximum afin que, libérés du travail fastidieux de comptage, ces mesures de débit soient effectuées dans les meilleures conditions.

II.1 3 2. Pour moulinets à génératrice de courant

Nous donnons sur la figure 23 les possibilités de mesures offertes par le moulinet OTT type 10.300.

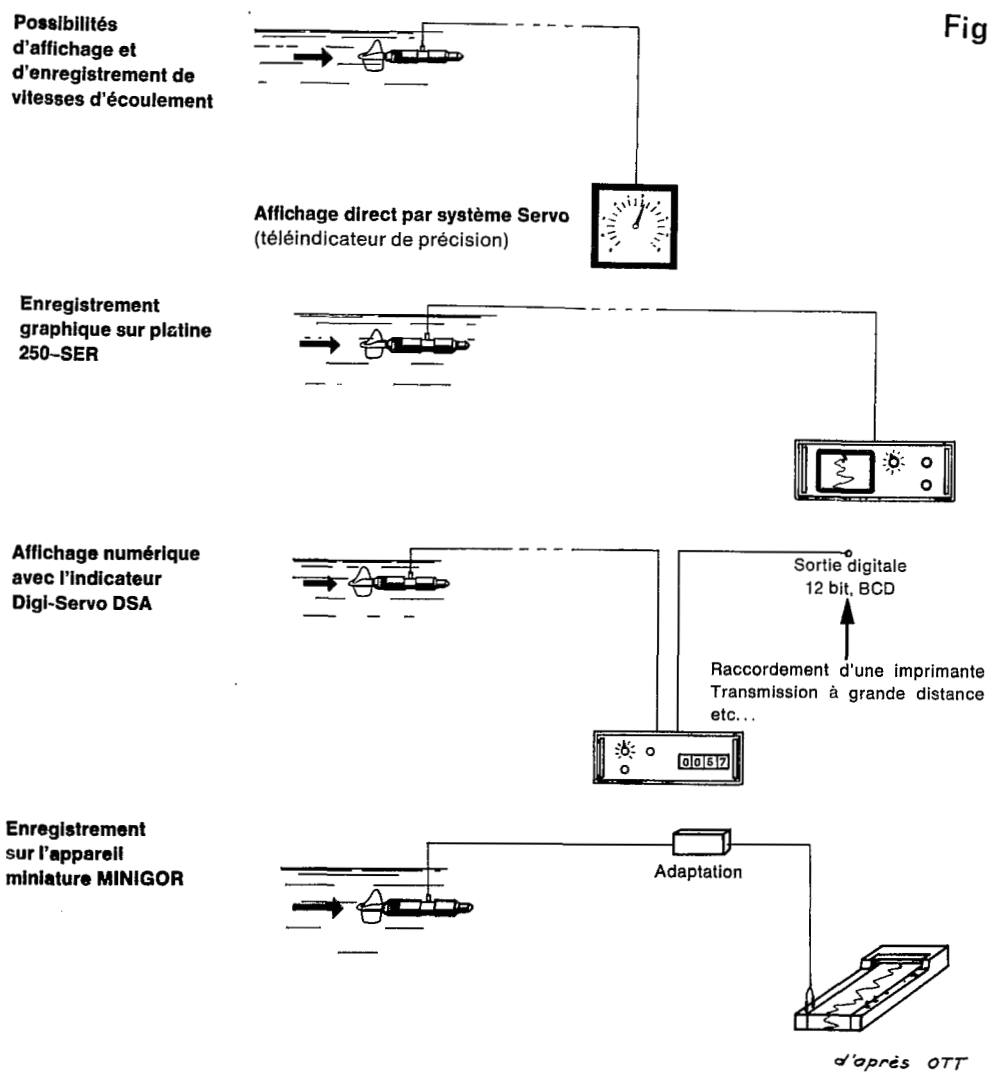


Fig.-23

Notice HLF 120/5

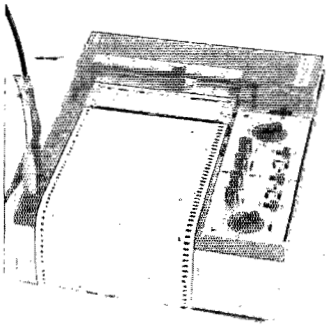
Le quatrième montage est celui que les hydrométristes pourront utiliser pour les jaugeages non permanents sur les rivières dans le cas où les fluctuations de vitesse sont importantes. La vitesse moyenne en chaque point sera obtenue par intégration de la courbe enregistrée pendant 30 ou 60 secondes.

Pour les jaugeages par intégration, il suffit de laisser fonctionner l'enregistreur pendant toute la descente du moulinet. (Le temps est mesuré à l'aide d'un chronomètre).

Dans le cas où les variations de la vitesse sont faibles, un voltmètre bien amorti donne de très bons résultats.

Nous mettons actuellement au point un compteur (CJR 30) qui intègrera automatiquement pendant 30 secondes les tensions fournies par le moulinet type 10.300 et qui affichera directement la valeur moyenne de la tension.

La figure 24 montre l'enregistreur MINIGOR.



L'enregistreur Minigor

Fig - 24

II. 1. 4. AUTRES APPAREILLAGES MODERNES POUR LA DÉTECTION DES VITESSES

II.1 4 1. Mesures au sein de l'écoulement

▪ Courantomètre électromagnétique : La Société Française BEN à Marseille, spécialisée dans la mesure des vitesses des navires à l'aide de capteurs électromagnétiques a eu l'idée de créer un capteur destiné à mesurer la vitesse en différents points d'un écoulement à surface libre. Deux appareils ont été étudiés et essayés sur le terrain : le capteur BEN "CM 01" et le capteur BEN "DIS 40". Ils ne sont utilisables, pour l'instant, que sur perche et ne diffèrent que par leur encombrement.

Le principe est le suivant : un liquide se déplaçant dans un champ magnétique au contact de deux électrodes fixes produits une force électromotrice induite disponible sur ces électrodes et représentative de sa vitesse instantanée :

$E = K H L V$

avec :

H intensité du champ magnétique,

L distance entre les électrodes,

V vitesse du fluide,

K coefficient dépendant du système d'unités
K = 1 avec le système internationale (m, m/s, TESLA).

Le système étudié par BEN comporte un sabot dans lequel est placé une bobine créant le champ magnétique et les deux électrodes aux bornes desquelles on mesure la tension produite par le déplacement de l'eau. L'ensemble peut fonctionner soit sur piles, soit sur secteur.

Les avantages sont les suivants :

- pas de pièces mécaniques en mouvement,
- relation linéaire entre vitesse d'écoulement et tension,
- pas d'inertie mécanique.

Inconvénients :

- seuil maximum de conductibilité du fluide indispensable,
- risque de détarage par oxydation ou souillures des électrodes,
- nécessité d'étalonnages fréquents (zéro).

La tension recueillie aux bornes est faible, ce qui nécessite un amplificateur encore très volumineux rendant difficile le montage sur saumon (nombreux fils d'alimentation et de sortie). Une autre difficulté pour l'utilisation sur saumon est la réalisation du zéro (eau immobile). La Société BEN étudie actuellement ces problèmes.

▪ Application de la technique ultrasonique : Cette application est encore au stade expérimental en hydrométrie. Le principe de mesure de la vitesse du courant repose sur la différence des temps de propagation d'ondes sonores se déplaçant horizontalement d'une berge à l'autre dans le sens du courant ou en sens contraire. On utilise pour cela des transducteurs piézo-électriques émetteurs et récepteurs à haute fréquence disposés comme l'indique la figure 25.

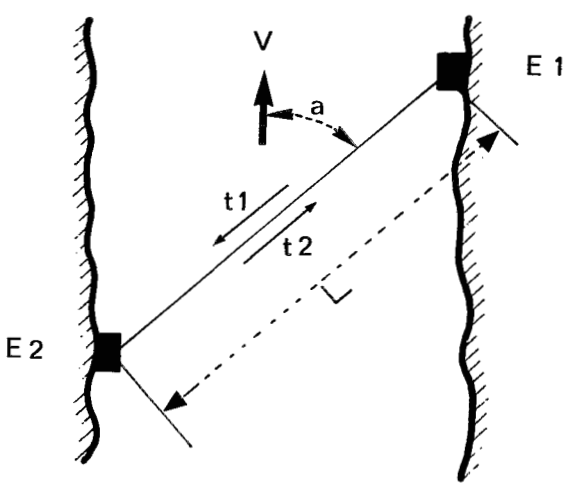


Fig-25

E_1 et E_2 émetteurs-récepteurs à ultrasons,

L distance parcourue par les ondes,

t_1 et t_2 temps de parcours,

V vitesse du courant,

C vitesse des ondes.

On a :

$$t_1 = \frac{L}{C - V \cos a} \quad \text{et} \quad t_2 = \frac{L}{C + V \cos a}$$

d'où $\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2 L V \cos a}{C^2}$ en négligeant le terme $- V^2 \cos^2 a$ au dénominateur. V pourra être calculée si on connaît C. Or, C est variable avec les caractéristiques de l'eau (densité, conductivité, température...). On détermine donc cette valeur avant et après chaque mesure à l'aide d'un émetteur-récepteur étalon émettant à courte distance dans l'eau vers une cible réfléchissante. Si h est la distance émetteur-cible, le temps mis par les ondes pour effectuer l'aller et retour est :

$$t_o = \frac{2 h}{C} \rightarrow C = \frac{2 h}{t_o}$$

On a donc finalement :

$$\Delta t = \frac{L \cos a \, t_o^2}{2 h^2} \cdot V$$

Le premier terme du deuxième membre est une constante de l'installation. En plaçant des couples d'émetteurs à poste fixe à diverses profondeurs, on obtient les vitesses moyennes dans des plans horizontaux de la section.

II.1 4 2. Mesures en surface

II.1 4 2 1. Courantomètre optique

Cet appareil, mis au point par l'U.S. Geological Survey, permet la mesure des vitesses en surface à partir d'un pont sans immersion de matériel. Il est constitué par une lunette donnant l'image de la surface de l'eau par réflexion sur un miroir entraîné par un petit moteur électrique dont on peut régler la vitesse avec précision. Par effet stroboscopique, en réglant la vitesse de rotation du miroir, on obtient une image dans laquelle la surface du plan d'eau paraît immobile. Cet appareil comporte un ruban gradué et lesté avec lequel on mesure la distance entre le miroir tournant et le plan d'eau. L'axe de l'appareil doit être perpendiculaire à la surface de l'eau. On peut l'utiliser directement posé sur le parapet d'un pont ou d'une passerelle. La vitesse en surface est donné par une relation de la forme :

$$V_s = K\ R\ H$$

dans laquelle :

K est une constante de l'appareil,
R la vitesse de rotation du miroir,
H la distance entre l'appareil et le plan d'eau.

Nous donnons ci-dessous la gamme des vitesses mesurées à différentes hauteurs par le Geological Survey (pour les vitesses maximales l'erreur de mesure est négligeable).

Hauteur H en m	Vitesse maximale en m/s	Vitesse minimale en m/s à ± 5% près
0,30	1,52	0,09
0,61	3,05	0,18
1,52	7,62	0,49
3,05	15,24	0,97
4,57	22,86	1,46
6,09	30,48	1,95

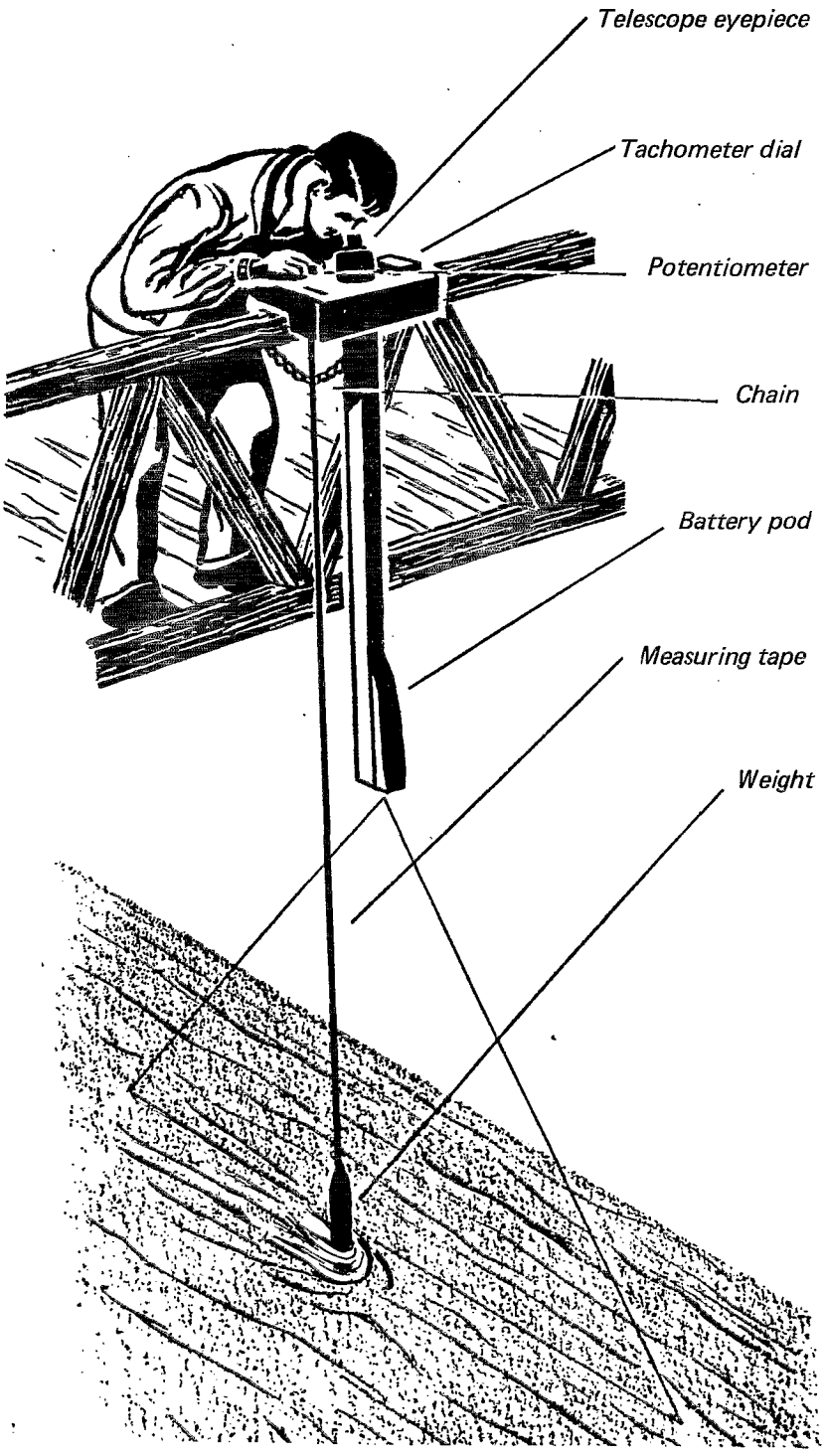
Cet appareil est commercialisé par R.A. MORGAN CO à PALO ALTO (Californie). La figure 26 montre l'utilisation de l'appareil à partir d'une passerelle.

II.1 4 2 2. Méthode du bateau mobile ou moving-boat method

Ceci n'est pas la description d'un appareillage mais d'une méthode utilisant du matériel classique.

Cette méthode, utilisée pour la mesure des débits des très grands fleuves (Amazone, Mississipi, Mekong...) a été mise au point par l'U.S. geological Survey. Le matériel utilisé pour mesurer les vitesses est constitué essentiellement par un moulinet monté à l'avant d'un bateau et d'un sondeur à ultrasons. La section est matérialisée par un alignement de quatre balises. Un appareil donne l'angle suivant lequel s'équilibre le moulinet pendant le déplacement du bateau à travers la section. Le bateau se déplace obliquement, à vitesse constante, sur la section de mesure : le moulinet donne la composante entre la vitesse du bateau et la vitesse du courant. La section mouillée est relevée par le sondeur.

Fig-26


Telescope eyepiece
Tachometer dial
Potentiometer
Chain
Battery pod
Measuring tape
Weight

On obtient ainsi la vitesse moyenne superficielle et la surface de la section mouillée.

En conclusion, on peut dire que les recherches actuelles tendent à mettre au point des méthodes de détection des vitesses dans les écoulements à surface libre à l'aide de matériel immergé ne comportant pas de parties tournantes ou même sans immersion de matériel. Cependant, les progrès sont très lents car, d'une part les signaux captés sont très faibles et nécessitent un matériel électronique d'amplification parfois très coûteux et, d'autre part, l'hydrométrie n'est pas une technique de pointe et les moyens mis à sa disposition sont le plus souvent très réduits. En conséquence, les moulinets de type classique resteront pendant de nombreuses années encore, les outils de base de l'hydrométriste.

Dans la suite de ce manuel, on ne parlera que des mesures effectuées avec les moulinets à hélice.

II. 2. LES SUPPORTS DE MOULINETS

Le moulinet, son hélice et le compteur d'impulsions constituent la base de l'équipement de jaugeage. Pour placer le moulinet dans l'écoulement, au point désiré, on utilise un support dont le choix, parmis les nombreux modèles existants, dépend des caractéristiques de la section et de l'écoulement (dimensions de la rivière, présence de pont, valeur des vitesses et du tirant d'eau à mesurer, etc...).

En fonction de ces conditions, l'hydrométriste aura le choix entre le montage du moulinet sur perche (appelé aussi montage rigide) et le montage du moulinet sur un poids de lestage ou saumon (montage souple).

II. 2. 1. MONTAGE SUR PERCHE

Pour les différents types de perches qui peuvent être employés, nous renvoyons le lecteur aux notices des constructeurs OTT et Neyrpic : HLf 120/8 OTT, M 23-24/a Neyrpic, ainsi qu'aux notices descriptives des moulinets particulièrement la notice HBf 10.050 de OTT où l'on peut voir le détail de différents montages. Précisons que tous ne sont pas utilisés en hydrométrie.

Monté sur perche, le moulinet est manoeuvre de deux manières :

- Directement par l'opérateur placé dans l'écoulement (jaugeage à gué ou méthode du "Wading"), la perche reposant sur le fond de la rivière,

- A partir d'une passerelle, la perche étant suspendue à un support permettant les déplacements verticaux.

Il est fortement déconseillé pour des raisons de sécurité et de précision des mesures, de monter la perche, soit tenue à la main, soit fixée à un support (pied de perche), sur une embarcation.

II.2 1 1. Perches fixes

Les catalogues font mention de montages compliqués et relativement lourds pour la manoeuvre du moulinet à l'aide d'un câble ou d'un treuil. Ces montages ne sont pas utilisés en hydrométrie courante. Les seuls montages employés sont les suivants :

. Moulinet fixé directement sur la perche,
. Moulinet mobile sur la perche grâce à une coulisse,
. Moulinet utilisé avec la perche AGAR III (voir note en Annexe).

Dans ces trois cas, la perche en acier inoxydable, a une section circulaire de 20 mm de diamètre. Les perches sont constituées par des éléments de 1 m, gradués tous les 10 cm (perche JANA ou TALBA de OTT, canne standard démontable, référence 2371 AB de Neyrpic). Le zéro est toujours au fond, sur le lit de la rivière. L'hélice est protégée contre les chocs éventuels, lors de la descente, par une petite pièce vissée sous le corps du moulinet (OTT).

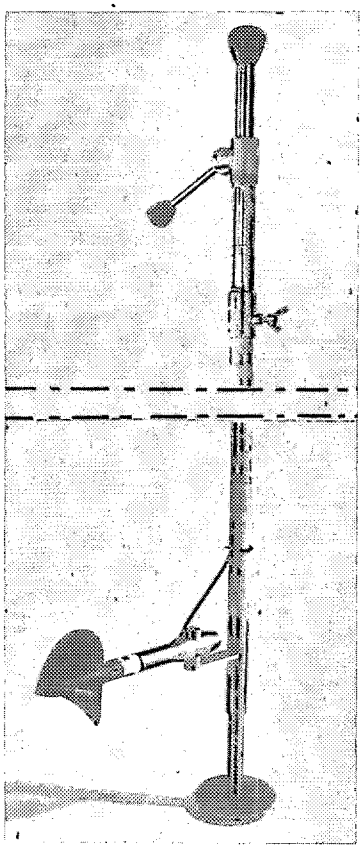
Le lecteur trouvera en annexe, de plus amples détails au sujet de ces matériels et montages. La planche VI montre quelques exemples de perches fixes et perches mobiles.

II.2 1 2. Perches mobiles

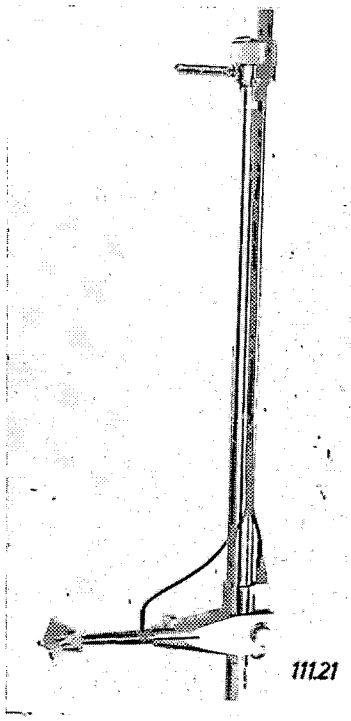
Lorsque le tirant d'eau et la vitesse deviennent trop importants (> 1 m et > 1m/s), et si la station de jaugeage est équipée d'une passerelle, il est possible de monter le moulinet sur perche suspendue manoeuvre à partir d'un support couramment appelé "pied de perche" ou à l'aide d'un chariot muni d'un treuil (voir planche VI).

Les perches rondes dont nous venons de parler peuvent être utilisées de cette façon, mais on préfère généralement utiliser des perches plus lourdes,de section ovoïde qui résistent mieux aux grandes vitesses. Les perches utilisées de cette manière sont graduées en dm et cm le plus souvent. Le répérage des profondeurs se fait devant un index placé sur le chariot ou le pied. Le zéro de la mesure peut indifféremment être choisi au fond ou à la surface de l'eau (notre préférence va à cette deuxième solution).

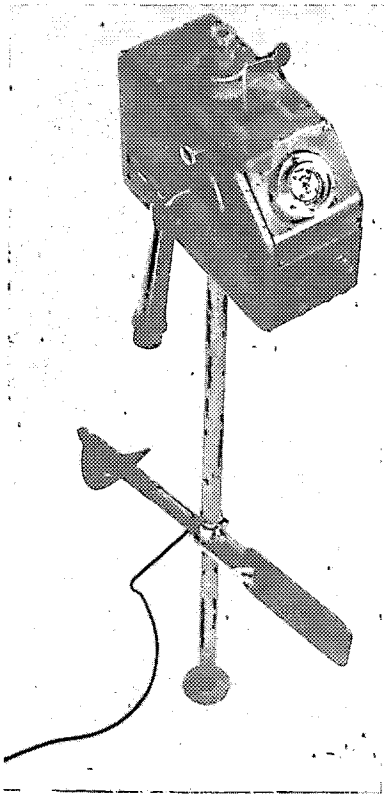
Planche VI



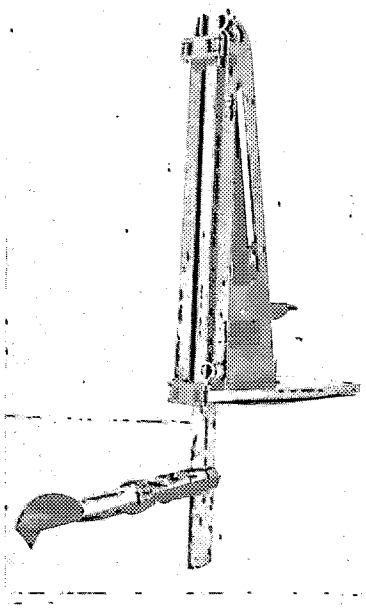
1



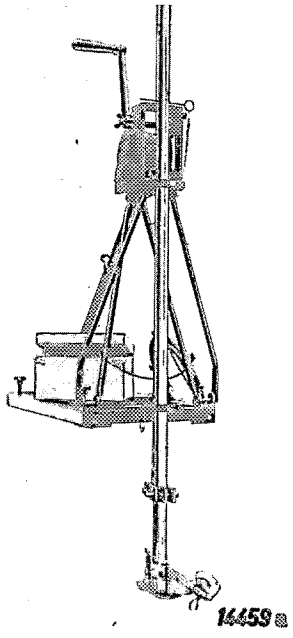
2



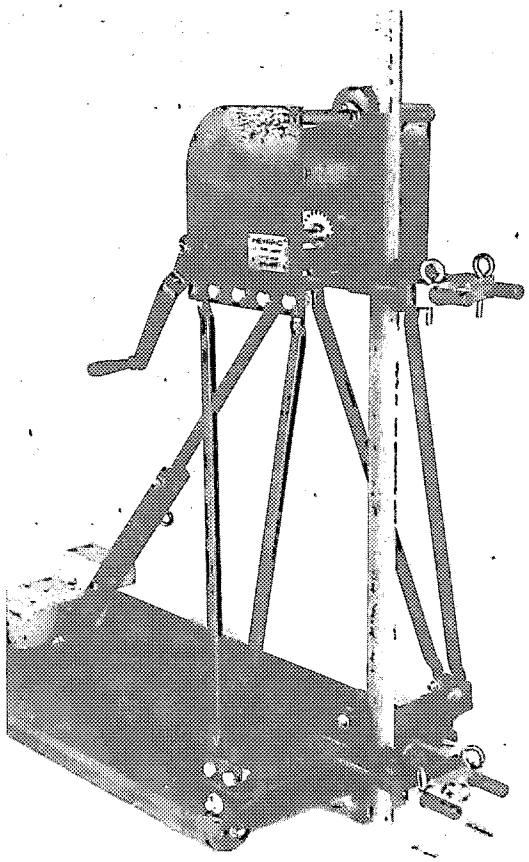
3



6



5



4

Planche VI

NOMENCLATURE

MONTAGES SUR PERCHES

1_ Perche NEYRPIC à coulisseau Ref. 2371 AB

2_ Perche OTT JANA de 20 mm avec coulisse HERES

3_ Perche AGAR III par intégration

4_ Chariot treuil NEYRPIC Ref. 2315 A

5_ Chariot treuil OTT

6_ Pied de perche NEYRPIC

II. 2. 2. MONTAGE SUR SAUMON

Les constructeurs réalisent des poids de lestage profilés ou saumons dont la masse varie de 5 à 130 kg (pouvant atteindre dans des cas spéciaux 200 kg) sur lesquels peuvent être fixés les moulinets à l'aide de pièces de jonction appropriées.

Il existe deux types principaux de saumons. Dans le premier type, le moulinet est fixé en bout, sur le nez du poids de lestage. Le saumon est muni d'une queue, équipée d'ailettes, destinée à maintenir le moulinet face au courant à mesurer. Certains constructeurs prévoient une rallonge pour cette queue dans le cas où la vitesse est très faible. Le déplacement des ailettes permet un équilibrage de l'ensemble : horizontalité parfaite lorsque l'appareillage est immergé.

Dans le second type, le moulinet est fixé au-dessus du saumon, sur une biellette articulée. Le saumon est alors plus massif et présente une forme aplatie (section transversale elliptique). Les ailettes de direction sont fixes et le saumon est équilibré une fois pour toutes en usine. Le moulinet est équipé d'une barre d'équilibrage qui le maintient horizontal dans l'eau, l'horizontalité est réglée par le déplacement des ailettes le long de la barre. Ce dispositif présente l'avantage d'assurer une meilleure protection du moulinet. Ce mode de fixation doit être préféré dans le cas de mesure, à partir de stations téléphériques, sur rivières en crue fortement chargées telles que les oueds d'Afrique du Nord ou les cours d'eau des zone sahéliennes ou de Madagascar.

Les saumons de l'un et l'autre type sont généralement munis d'un détecteur de fond fermant le circuit électrique de comptage des impulsions lorsque l'appareil touche le fond de la rivière. Le système est légèrement différent suivant les constructeurs :

- Chez Neyrpic, le détecteur de fond est constitué par un interrupteur à mercure incorporé dans un bloc de plastique absolument étanche, placé dans une pièce métallique articulée autour d'un axe horizontal. L'efficacité de l'ensemble peut être augmentée en fixant une plaque de surface plus grande sur la palette pour les mesures sur rivières à fond sableux.

- OTT utilise un système constitué par un disque métallique placé sous le poids de lestage, solidaire d'une tige traversant ce dernier et sur laquelle est fixé un petit aimant permanent. Lorsque le saumon touche le fond, la tige s'enfonce et l'aimant vient se placer devant un interrupteur à lames souples qui ferme le circuit. Un ressort de rappel assure l'ouverture du contact dès que le saumon est soulevé. Les contacts de fond sont montés sur tous les saumons à partir d'une masse de 25 kg.

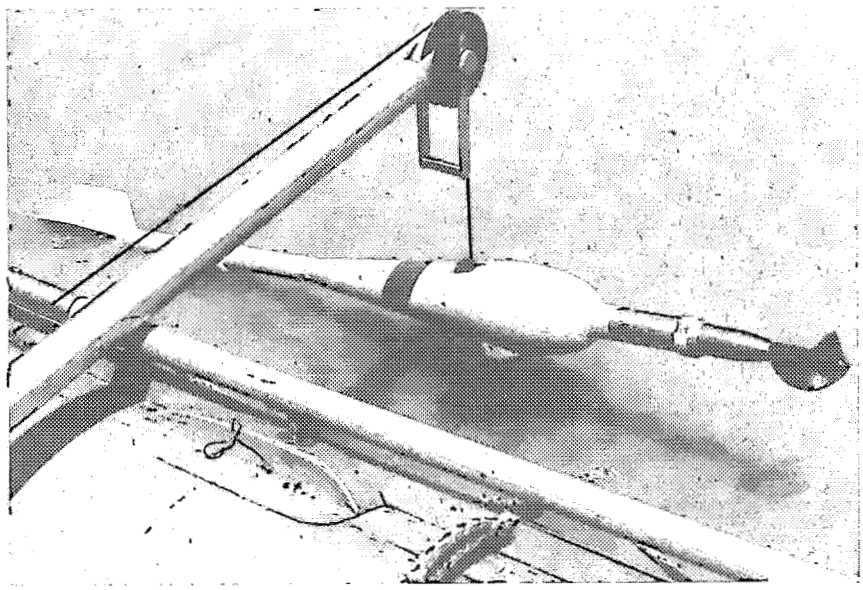
Neyrpic a adapté un système de suspension étudié pour réduire la traînée hydraulique et incorporé dans une cavité du saumon.

Le saumon s'oriente toujours dans l'axe du courant ; il est donc inutile d'utiliser une hélice auto-composante.

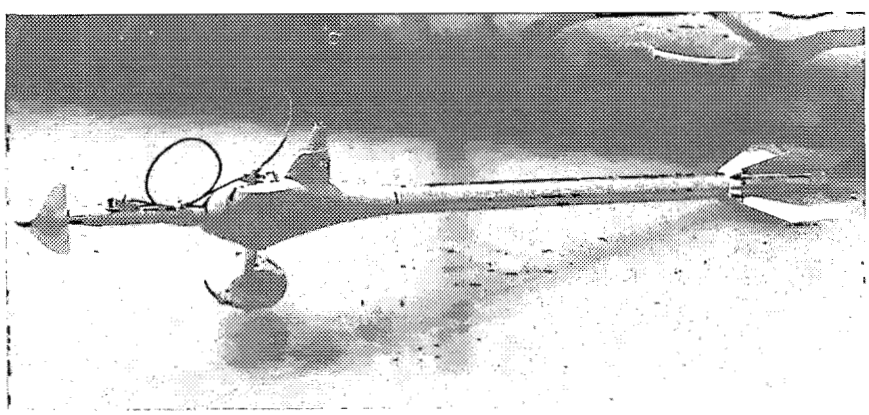
Suivant le mode de fixation adopté, le moulinet se trouve placé plus ou moins haut par rapport à la semelle du détecteur de fond. Il importe de connaître avec précision cette distance appelée "constante du saumon". Pour définir cette constante, procéder comme suit : suspendre le saumon au-dessus d'une surface plane horizontale (sol en béton par exemple). Maintenir le saumon parfaitement horizontal pendant toute la durée de l'opération. Faire descendre ainsi le saumon jusqu'à la fermeture du contact. Puis, remonter légèrement afin d'obtenir l'ouverture du circuit. La "constante du saumon" se mesure dans cette position : circuit ouvert, entre le sol et l'axe de l'hélice. Sur le terrain, la profondeur sera toujours lue sur le compteur au moment où, après avoir légèrement remonté le saumon, le signal lumineux ou acoustique actionné par le détecteur de fond disparaît.

La planche VII représente différents types de saumons.

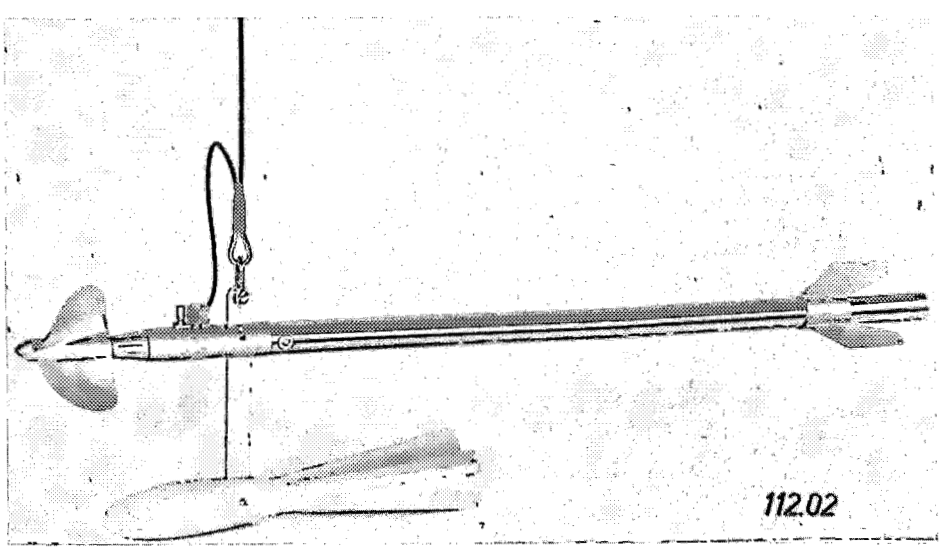
Saumon NEYRPIC 23 kg



Saumon OTT 25 kg



Saumon OTT 10 kg



II. 3. DÉPLACEMENTS DU SUPPORT DE MOULINET

Nous distinguerons le matériel utilisé pour les déplacements verticaux destinés à l'exploration de chaque verticale et les matériels utilisés pour les déplacements horizontaux et destinés à l'exploration de la totalité de la section. Il est bien évident qu'une mesure de débit nécessitera un ensemble de matériels avec lequel il sera possible de réaliser commodément ces deux déplacements, ensemble de matériels qui dépend des caractéristiques de la section et des conditions d'écoulement.

II. 3. 1. DÉPLACEMENTS VERTICAUX

II.3 1 1. Déplacement manuel

Une façon simple, mais peu commode, est réalisée par déplacement manuel du moulinet sur la perche dans le cas de jaugeage à gué. Une amélioration a été apportée par les coulisses dont nous avons déjà parlé.

II.3 1 2. Pieds de perche et chariot-treuil

Nous avons déjà cité ces appareils dans le cas de la perche mobile ou suspendue. On opère à partir d'un pont ou d'une passerelle. La perche coulisse dans le pied de perche ou le chariot. La position du moulinet est repérée en face d'un index ou sur le compteur du treuil.

II.3 1 3. Treuils

Il existe trois catégories de treuils :

. les treuils simples,
. les treuils doubles,
. les treuils spéciaux.

Les treuils simples sont montés sur porte à faux, sur cyclo-potence ou éventuellement sur perche. Les treuils doubles ne sont utilisés que pour la manoeuvre des stations téléphériques. Les treuils spéciaux actionnent certains types de cyclo-potence.

Tous les treuils sont équipés d'un système de démultiplication afin de réduire les efforts pendant la manoeuvre et d'un système de freinage par la charge. Le frein automatique est logé, généralement, dans la manivelle. L'action de l'opérateur sur la manivelle débloque le frein pour la remontée. De même, un léger effort de l'opérateur sur la manivelle suffit à vaincre le frottement du frein pour la descente (il n'y a pas besoin de toucher au cliquet qui n'est là que pour assurer le fonctionnement du frein sous l'action de la traction du saumon).

Les différents constructeurs ont prévu pour chaque type de treuil des ralentisseurs de descente pour exécution de jaugeages par intégration de la vitesse le long de la verticale. Le freinage est obtenu par déplacement plus ou moins grand de billes sous l'action de la force centripète à l'intérieur de pièces coniques (cas du ralentisseur OTT). La vitesse de descente peut ainsi être réglée de 2 à 5 cm/s. Les systèmes de freinage utilisant des palettes tournant dans 1'air ont été abandonnés à cause du danger qu'ils présentaient pour les opérateurs.

Notons qu'il ne faut jamais (en l'absence de ralentisseur) donner une impulsion rapide à la manivelle sans la tenir avec la main, car la vitesse initiale ainsi communiquée au saumon peut augmenter le couple dû à la traction du câble et provoquer la descente rapide de l'ensemble saumon et moulinet, occasionnant à la fois des dommages au matériel et des accidents à l'opérateur par suite de la rotation très rapide de la manivelle.

La transmission des contacts du moulinet et du détecteur de fond se fait par l'intermédiaire de balais frottant sur des collecteurs en cuivre isolés fixés sur le tambour.

On mesure la profondeur à l'aide d'un compteur centimétrique à chiffres sauteurs commandé soit par une poulie sur laquelle passe le câble, soit directement par le tambour d'enroulement lorsqu'il n'y a qu'une seule couche de câble. Dans ce cas, il est recommandé de ne pas mettre plus d'une couche de câble sur le tambour, en effet l'utilisation de plusieurs couches entraînerait des erreurs dans l'indication du compteur.

Tous les compteurs sont munis d'un système de remise à zéro. Les constructeurs demandent de préciser à la commande si le compteur doit compter en descendant ou en montant, autrement dit si le zéro doit être placé à la surface de l'eau ou sur le lit de la rivière. Il nous semble que la préférence doit être donnée à la première formule. En effet, les opérations se déroulent dans un ordre logique : zéro à la surface puis descente du moulinet jusqu'au fond.Si on travaille par intégration, la mesure est finie et on connaît la profondeur. Si on travaille point par point,on connaît la profondeur et on peut répartir les points sur la verticale et faire les mesures de vitesse en chacun des points choisis en remontant le saumon.

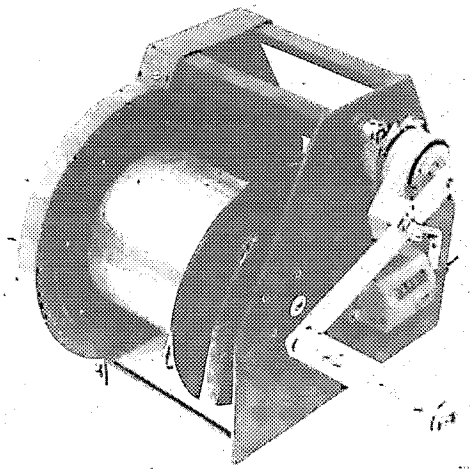
Les treuils doubles comportent deux tambours actionnés simultanément par la même manivelle lors des déplacements horizontaux du saumon. Pour les déplacements verticaux, les tambours sont rendus indépendants par un système de débrayage. La transmission des signaux se fait comme dans les treuils simples, grâce à un collecteur et des balais. Des compteurs solidaires des deux tambours donnent la position du saumon en abscisses et en ordonnées.

La planche VIII montre quelques types de treuils utilisés en hydrométrie.

Planche VIII

TREUILS OTT

Treuil simple de 100 kg



Treuil simple de 25 kg

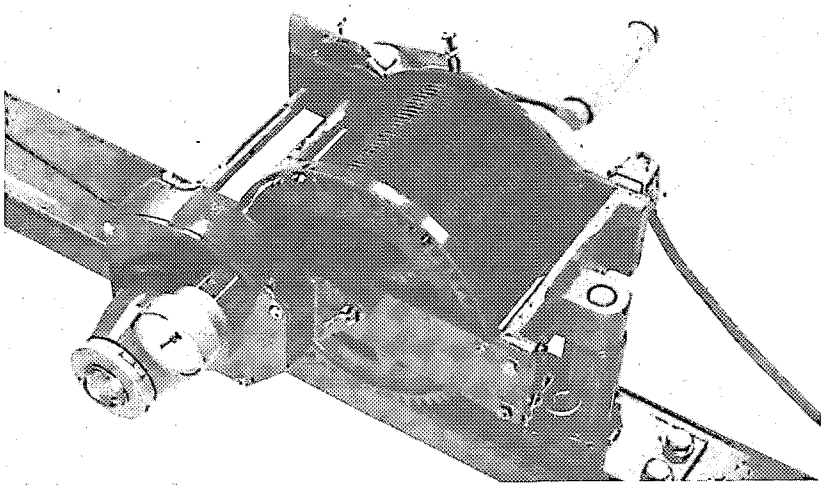


Photo OTT

Treuil simple de 25 kg monté sur bateau gonflable

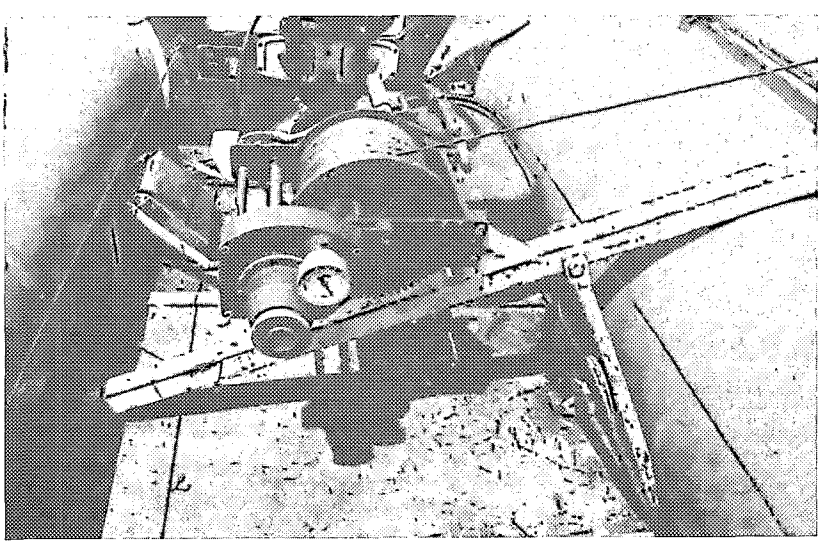
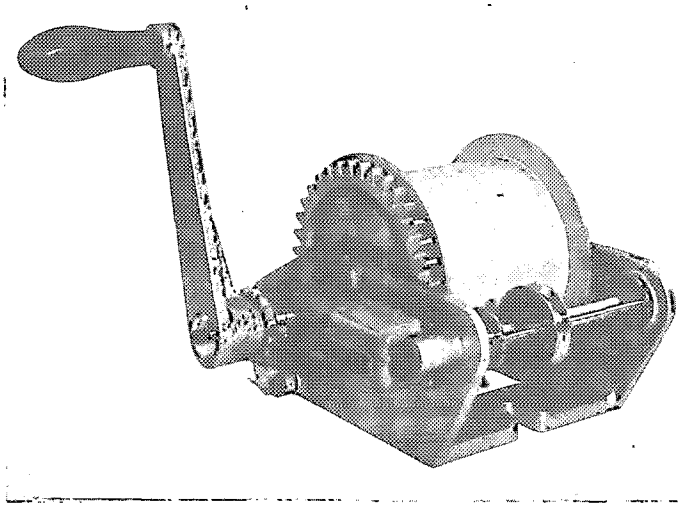
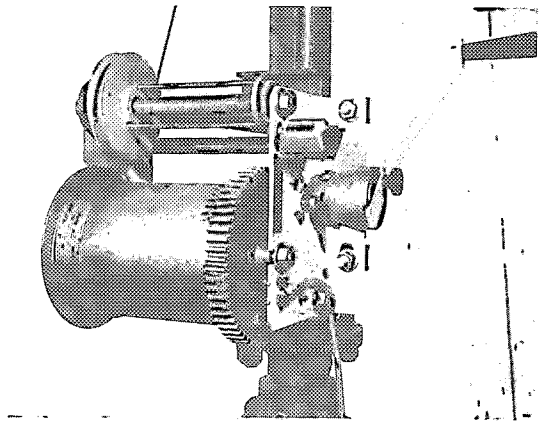


Photo Brunato Aldegheri

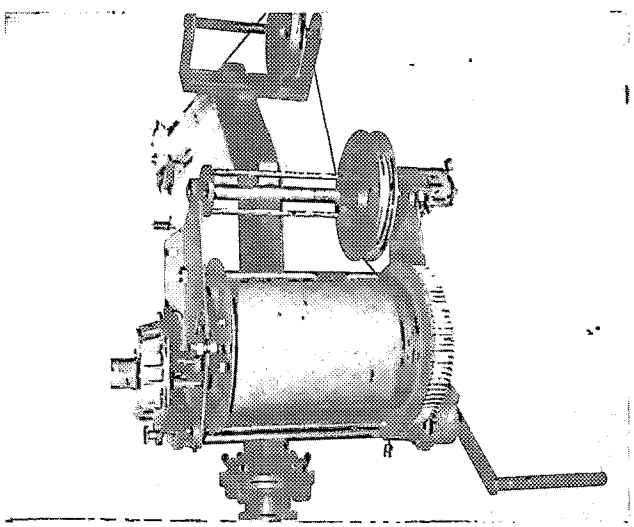
TREUILS NEYRPIC



Ref. 2425 _ Type léger



Ref. _ Type moyen



Ref. _ 2426 T Régulateur de vitesse

Photo Neyrpic

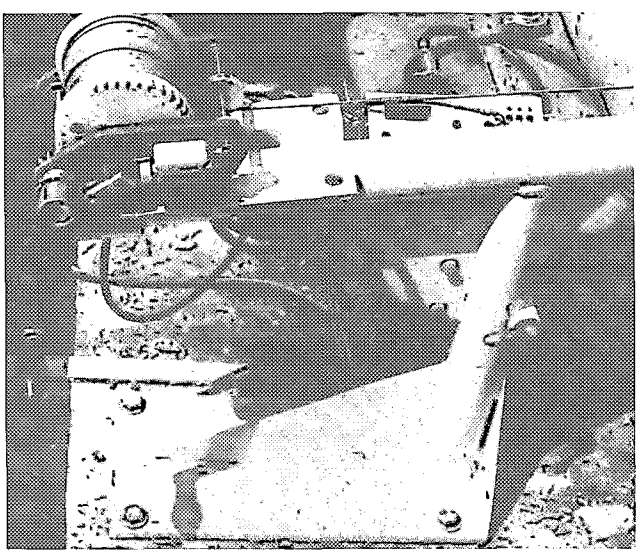


Photo Brunato Aldegheri

Montage d'un treuil léger sur bateau

II.3 1 4. Les câbles

Le saumon est suspendu au treuil par l'intermédiaire d'un câble électroporteur constitué généralement par un ou plusieurs conducteurs isolés placés au centre et entourés par les fils d'acier porteurs.

Le type de câble le plus utilisé est le câble spiraloïdal monotoron (câble à torsions alternatives ou antigiratoires) à deux couches de fil d'acier câblées en hélice alternativement à droite et à gauche. Les câble du type hélicoïdal à fils ronds (plusieurs torons enroulés dans le même sens autour de l'âme) sont à proscrire. Ils ont en effet tendance à se détorsionner lorsqu'ils supportent une charge non guidée et ceci entraîne la rupture de l'isolant et des mises à la masse du conducteur toujours très difficiles à déceler.

Il est important, lorsqu'on fait des mesures avec de fortes vitesses et de grandes profondeurs, de choisir un câble électroporteur dont le diamètre extérieur soit le plus petit possible afin de limiter au maximum la traînée du câble qui est, dans tous les cas, beaucoup plus importante que la traînée propre du saumon. Pour cette raison, on n'utilise que très rarement des câbles électroporteurs à plusieurs conducteurs.

Les câbles les plus couramment employés ont un diamètre de l'ordre de 3 mm (2,8 mm chez Neyrpic et 3,5 mm chez OTT).

Les signaux du moulinet et du détecteur de fond sont transmis par le conducteur unique. La fermeture du circuit électrique est assurée par la masse du moulinet et du treuil et les fils d'acier du câble électroporteur.

II. 3. 2. DÉPLACEMENTS HORIZONTAUX

II.3 2 1. Déplacement manuel

Dans le jaugeage à gué, l'opérateur explore la totalité de la section en déplaçant la perche à la main.

II.3 2 2. Station hydrologique située près d'un pont ou d'une passerelle

Plusieurs solutions sont possibles :

II.3 2 2 1. Perche mobile

Le chariot-treuil dispose en général de galets de roulement. Avec pied de perche simple, le déplacement est fait à la main (peu pratique).

II.3 2 2 2. Porte à faux rudimentaire

Le treuil est fixé sur un porte à faux comme indiqué sur la figure 26. Le porte à faux est appuyé sur le parapet du pont et déplacé à la main par les opérateurs. Un contre poids C équilibre le saumon . Le treuil peut évidemment être équipé d'un régulateur de descente pour jaugeages par intégration.

Ce montage n'est valable que pour des saumons légers (5 à 25 kg) et pour des vitesses faibles (jusqu'à 2 m/s max avec 25 kg). On peut améliorer ce système en mettant des galets sous le porte à faux à hauteur du parapet et en bout de la barre pour le déplacement sur le trottoir.

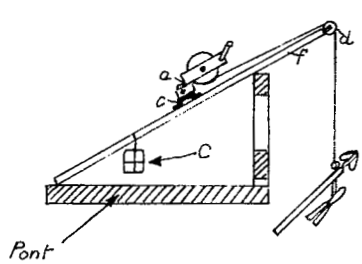


Fig - 27

II.3 2 2 3. Cyclopotences

Le terme cyclopotence a été crée pour désigner une sorte de mât de charge ou potence orientable monté sur une plateforme à roulettes caoutchoutées permettant de manoeuvrer facilement le moulinet et son contre-poids au-dessus du garde corps des ponts. Il existe deux types de cyclopotence : les premières utilisent les treuils d'hydrologie simples manoeuvrés à la main, les secondes un treuil électrique spécial actionné par un groupe électrogène.

Le planche IX montre quelques appareils de ce type actuellement disponibles sur le marché.

- Cyclopotence manuelle :

On peut manipuler avec ces appareils des saumons dont la masse peut aller jusqu'à 130 kg. Des gueuses de lestage en fonte de 25 kg, empilables, permettent l'équilibrage de l'ensemble. Lors de la manipulation de saumons lourds, il convient d'être très prudent pendant les manoeuvres. Si l'on se trouve sur un trottoir en béton en bon état, les déplacements horizontaux sont faciles. Les jaugeages peuvent se faire soit points par points, soit par intégration, le treuil étant équipé d'un régulateur de descente.

Le modèle léger réf. 2434 A de Neyrpic, pour saumons jusqu'à 50 kg, présente deux avantages : son faible poids d'abord et ensuite la possibilité de pouvoir utiliser la flèche orientable et coulissante sur une embarcation grâce à une embase qui se fixe sur le platelage.

- Cyclopotence électrifiée :

La Division Technique Générale de l'E.D.F. a mis au point un système de cyclopotence électrifiée actuellement construite et commercialisée par MECABOLIER. Cette potente est destinée à la réalisation de jaugeages au moulinet en rivière à l'aide de saumons de 50 ou 80 kg.

Planche IX

NOMENCLATURE

CYCLOPOTENCES

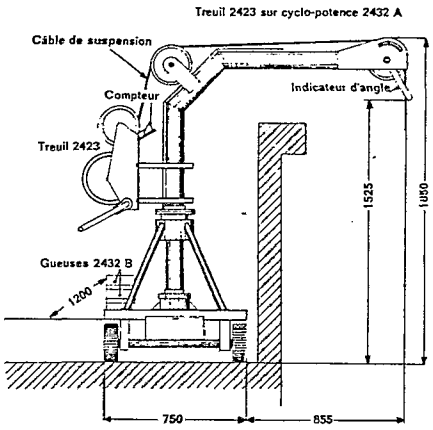
1- Modèle NEYRPIC EDF
2- Modèle lèger NEYRPIC

} D'après doc. NEYRPIC

3- Jaugeage avec cyclopotence NEYRPIC EDF (Photo Neyrpic)

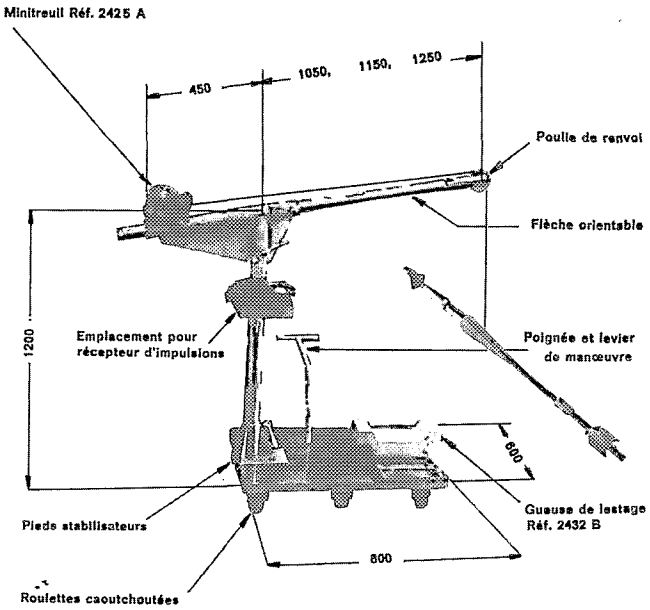
4- Cyclopotence électrifiée EDF-DTG Nécabolier de montée (Photo Aldégheri)

5-6 Jaugeage de L'ARIEGE avec cyclopotence electrifiée (Photos Aldegheri)

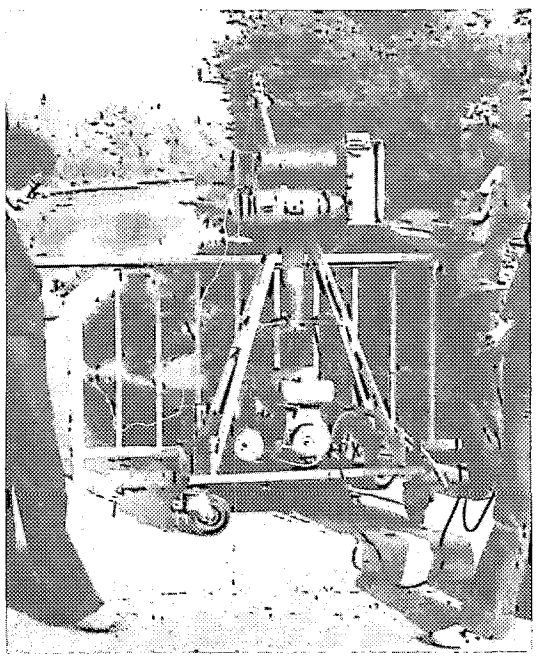


Réf. 2432 A :
Modèle Neyrpic-E.D.F.

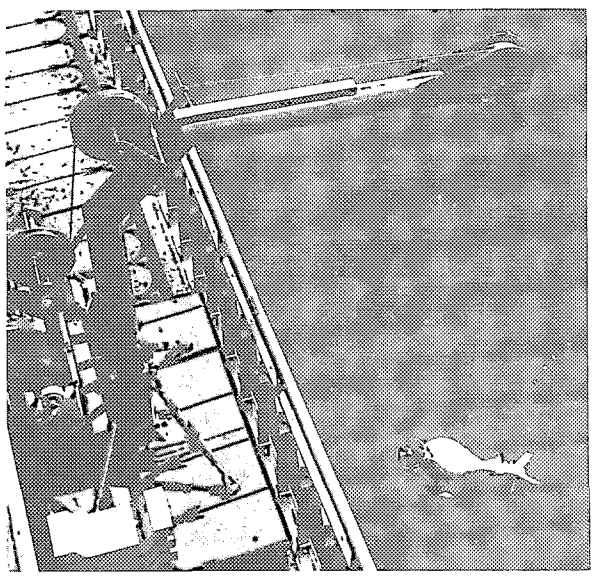
1



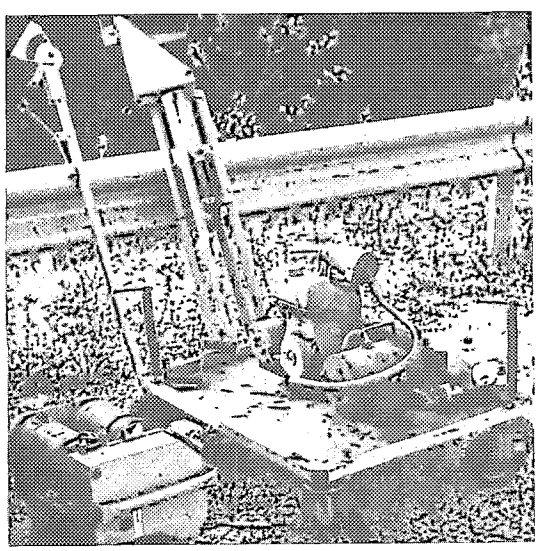
2



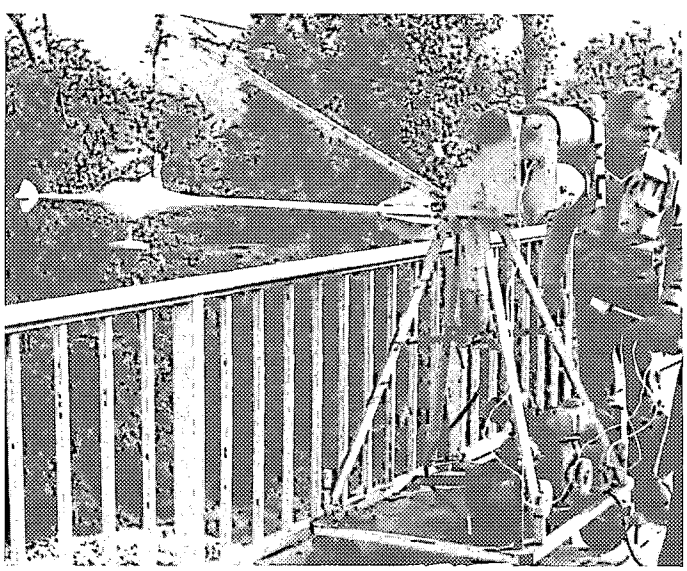
6



3



4



5

Cet appareil se compose de six parties essentielles (voir figure 28) :

- le chariot muni de quatre roues avec frein et vérins de réglage en hauteur,
- les quatre pieds repliables,
- le support pivotant,
- la flèche,
- l'ensemble moto-réducteur-treuil,
- le groupe électrogène et le circuit électrique.

Cette cyclopotence permet la réalisation de jaugeages par intégration en remontant le moulinet après un réglage correct de la vitesse du treuil. En cas de panne, une manivelle permet l'utilisation en cyclopotence manuelle.

- Porte à faux sur véhicule :

De nombreux hydrométristes ont eu l'idée d'utiliser un véhicule pour déplacer horizontalement le moulinet monté sur saumon. Les montages les plus divers ont ainsi été réalisés. Ce montage peut se réaliser sur n'importe quel véhicule.

Nous donnons en annexe le schéma du montage réalisé à Toulouse sur un Fourgon Peugeot.

Le principal avantage de ce système réside dans le fait que les opérateurs sont à l'abri du vent et de la pluie pendant les mesures. Il pose cependant quelques problèmes dans le cas de ponts étroits (arrêt de la circulation). Il convient également d'être très prudents dans le cas de ponts avec trottoirs en console qui ne supportent pas toujours le poids d'un véhicule.

POTENCE LEGERE ELECTRIFIEE

E.D.F - D.T.G

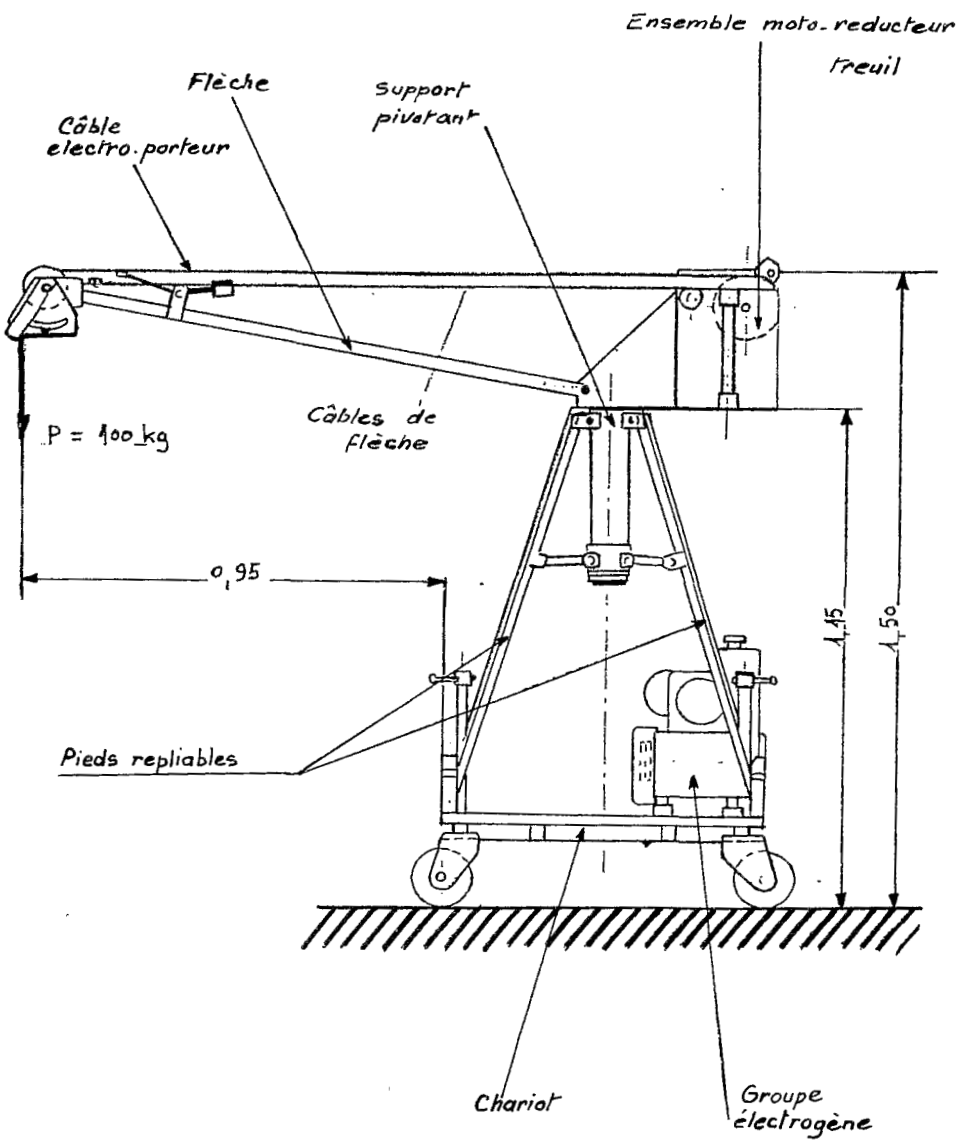


Fig - 28

II.3 2 3. *Stations hydrologiques près desquelles il n'existe pas de pont*

Dans ce cas, deux solutions : le bateau pour les vitesses faibles ou moyennes, la traille téléphérique pour les vitesses supérieures à 3 m/s.

II.3 2 3 1. Bateau (voir planche X)

Nous distinguerons deux cas :

- les déplacements ont lieu par la route, le bateau étant transporté sur un véhicule pour les tournées de contrôle des stations d'un réseau, c'est ce que nous appelons l'équipement léger.

- les déplacements s'effectuent par voie d'eau et les jaugeages sont réalisés directement à partir du bateau utilisé pour le déplacement, cas des jaugeages sur les grands fleuves navigables (Congo, Niger, Bénoué, fleuves d'Amazonie, etc...), c'est ce que nous appelons l'équipement lourd.

- Equipement léger :

L'embarcation idéale est le canot pneumatique, type Zodiac MARK II équipé d'un moteur hors-bord de 20 à 25 CV maximum. Une puissance supérieure nous semble inutile et ne sert qu'à compliquer les problèmes de transport et les manipulations. Les caractéristiques du Zodiac MARK II (longueur hors tout 4,20 m, largeur 1,67 m, réserve de flottabilité 1290 litres, boudins gonflables en trois compartiments) permettent de monter à bord 4 personnes plus une quantité de matériel assez importante en toute sécurité.

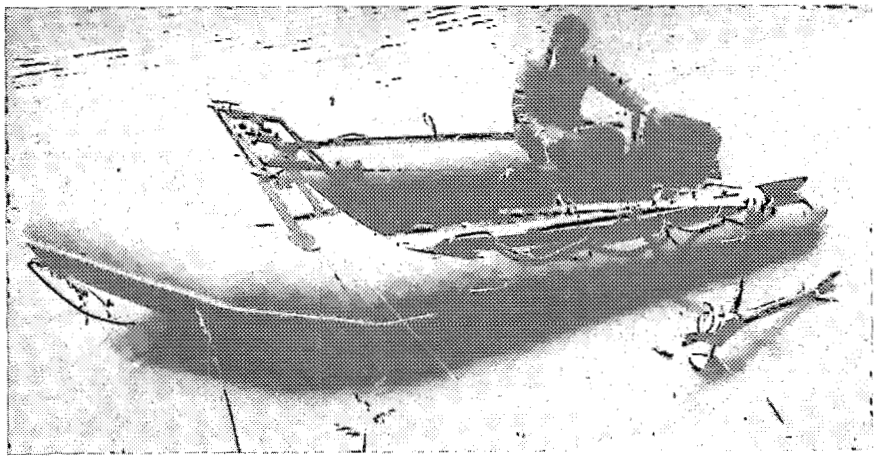
Pour les jaugeages en rivière, divers montages ont été utilisés, il sont plus ou moins pratiques et leurs possibilités (stabilité en crue, mesures avec des vitesses 2,50 à 3 m/s) plus ou moins intéressantes.

Nous décrivons en annexe le montage que nous avons mis au point et qui nous semble parfaitement adapté aux mesures de contrôle des stations d'un réseau.

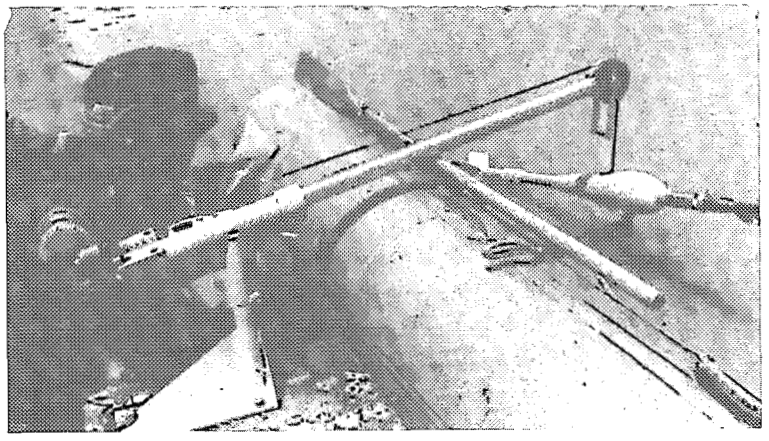
Planche X

JAUGEAGE A L'AIDE D'UN BATEAU LEGER

1_ Fixation du treuil supportant le cable matérialisant la section



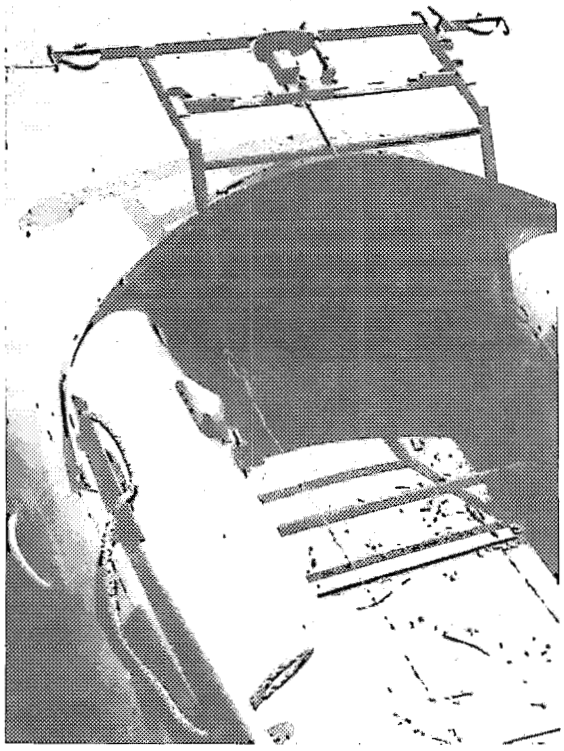
2_ Vue d'ensemble du montage : chariot de translation et potence pour matériel OTT



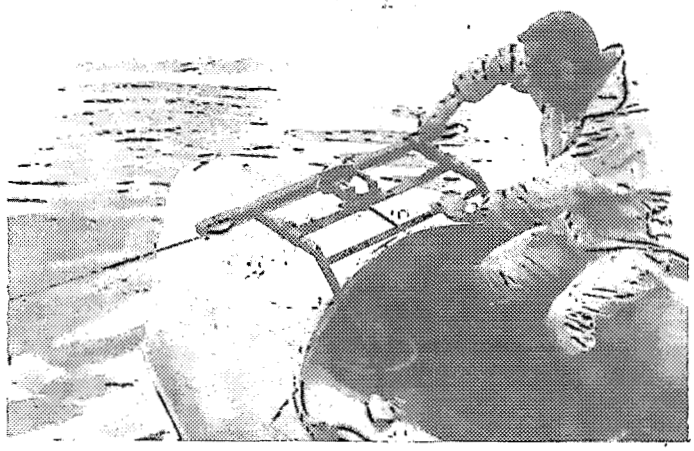
Montage de la potence légère NEYRPIC

Photos Aldegheri _ Brunato

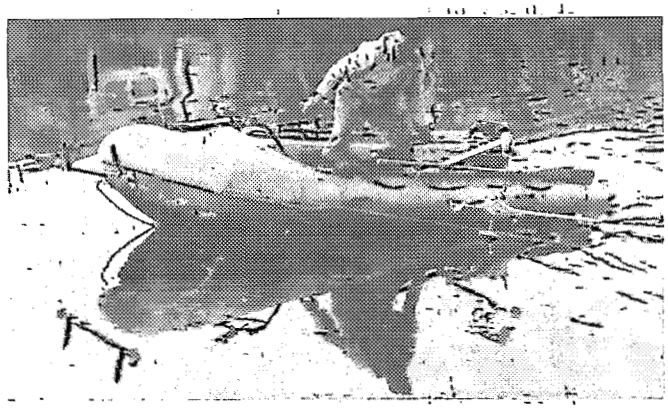
Planche X (suite)



Vue du chariot de translation et de la fixation au bateau



Blocage du frein sur le cable



Déclenchement du chariot

Amarrage du bateau au chariot après déclenchement

Passage du cable sur le Mangoro

Photos Aldegheri

Le saumon est manoeuvré à l'aide d'une potence simplifiée ou de la potence légère Neyrpic. La fixation du bateau au câble définissant la section est réalisée à l'aide d'un chariot largable muni d'un compteur pour la mesure de la largeur et le repérage des abscisses.

- Equipement lourd :

Les mesures de débit sur les grands fleuves (Congo, Niger, fleuves du Bassin Amazonien,...) avec des vitesses importantes et de grandes profondeurs, requièrent des embarcations de grandes dimensions. Dans ce cas, le choix de l'équipement dépend des moyens dont on dispose. Il peut aller de la pinasse de 12 m plus ou moins bricolée, au bateau laboratoire de 20 m et plus. La planche XI montre un bateau de 12 m propulsé par deux moteurs diesel de 50 CV et équipé pour les jaugeages et les mesures de transports solides sur la Bénoué. En 1954, la mission NEDECO sur le Niger utilisait cinq bateaux de 25 m de long, jaugeant 45 tonneaux avec un tirant d'eau de 0,90 m luxueusement équipés. Dans son article sur les premiers jaugeages précis réalisés par l'ORSTOM sur le Congo, Pouyaud décrit le matériel dont il disposait pour jauger 38000 m3/s.(1)

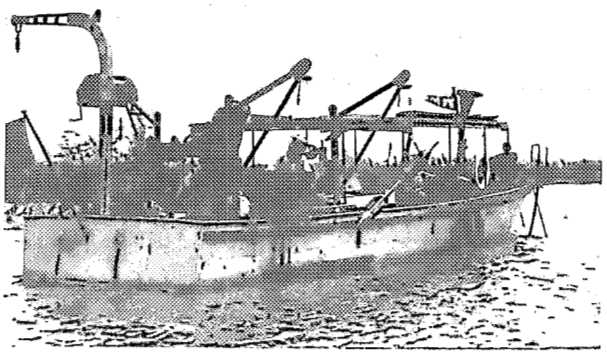
Signalons, bien que nous ne l'ayons jamais utilisé, le canot MARK V de ZODIAC qui, avec une longueur de 5,80 m, une largeur de 2,40 m, une charge utile de 2000 kg et équipé d'un moteur hors-bord de 115 CV (ou de deux moteurs couplés de 50 CV) devrait pouvoir être utilisé pour la mesure des débits sur les grands fleuves.

---

(1) POUYAUD - Premiers jaugeages précis réalisés par l'ORSTOM sur le Congo - Maluku Tréchot
Cahiers ORSTOM Hydrologie - Vol. IX N° 2 - 1972

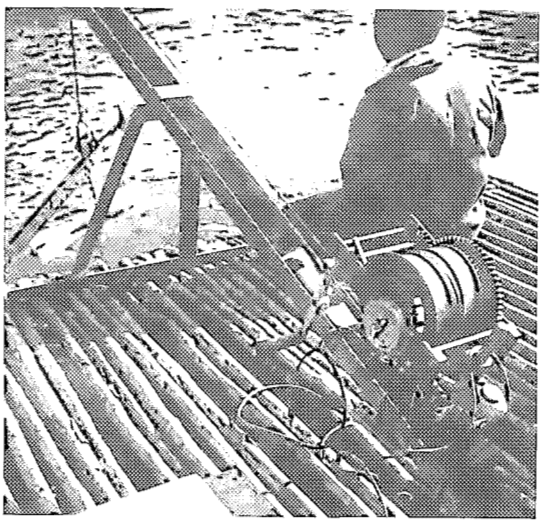
Planche XI

CAS PARTICULIERS



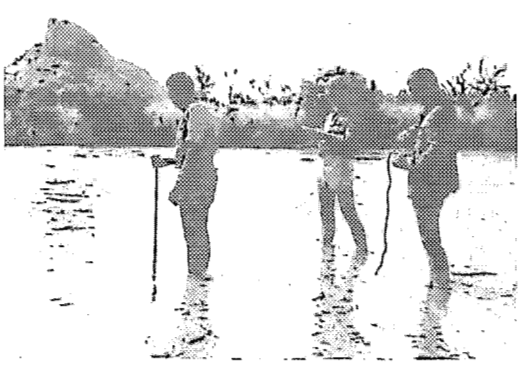
Bateau de 12 m équipé de 2 moteurs de 50 cv pour mesures de débit et transports solides sur la BENOUE

Jaugeage d'étiage sur l'IVOANANA à l'aide d'un radeau en bambous



Jaugeage d'étiage sur le MANGOKY avec des pirogues de fabrication locale

Jaugeage à la perche ordinaire sur la MANAVANTANANA

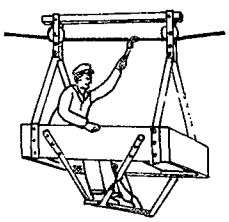


Photos Aldegheri

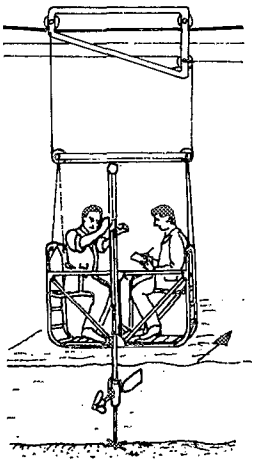
II.3 2 3 2. Trailles téléphériques ou transporteurs aériens

Lorsque les vitesses à mesurer dépassent 3 m/s ou que la station est située immédiatement à l'amont de chutes importantes, le seul matériel utilisable est la traille téléphérique ou transporteur aérien.

Nous ne parlerons ici que des transporteurs aériens pour saumons et moulinets. Nous citerons pour mémoire les transporteurs destinés aux déplacements d'une nacelle sur laquelle peuvent prendre place un ou deux opérateurs manoeuvrant directement l'équipement de mesure. La nacelle peut se déplacer par traction des opérateurs sur le câble porteur (modèle simple) ou à l'aide d'un treuil double placé sur une berge ; dans ce cas, les déplacements peuvent être horizontaux et verticaux afin de se rapprocher au maximum du plan d'eau (voir figure 29).



Caisse suspendue Mesta aménagée pour transporteur aérien simple



Sièges suspendus Sulina pour jaugeages au moulinet avec transporteur aérien

D'après OTT

Fig - 29

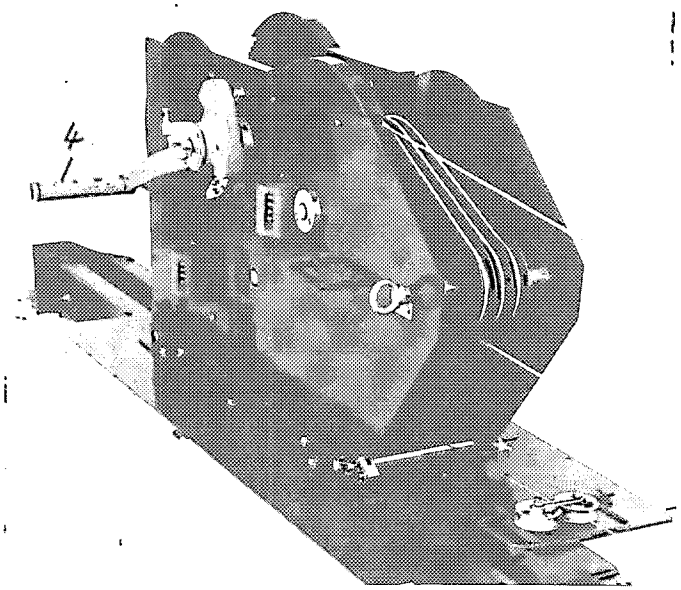
Dans ce genre d'installation, les coefficients de sécurité à appliquer sont très importants. Ceci entraîne une augmentation notable des prix de revient.

Dans les notices M244 de Neyrpic et HLf 120/13 de OTT, le lecteur trouvera les détails de construction et les principes de fonctionnement des différents types de téléphériques existant actuellement sur le marché.

La planche XIImontre quelques exemples de stations fabriquées par OTT et Neyrpic et des vues de stations utilisées à Madagascar.

On peut distinguer deux types de stations téléphériques : les stations légères et mobiles pour rivières peu larges (portée maximale 50 m) utilisées avec des saumons d'une masse maximale de 50 kg et les stations fixes sur grandes rivières, jusqu'à 250 m, pour saumons lourds (100 kg).

1



TREUILS DOUBLES OTT

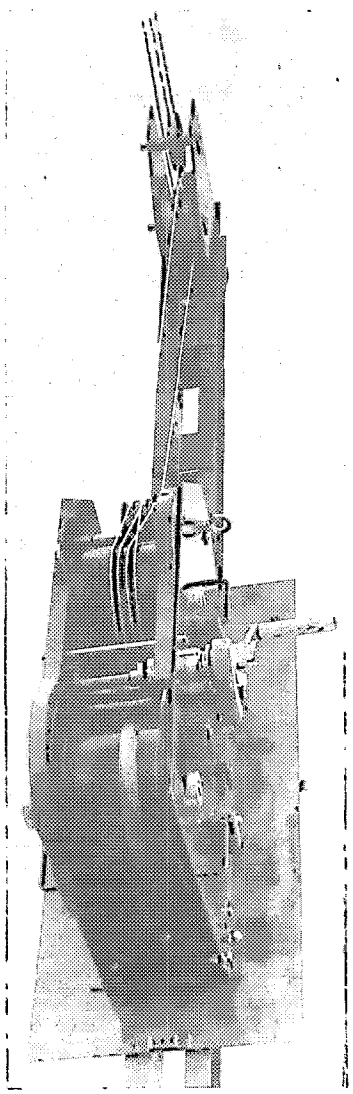
1_Treuil manuel 100 kg

2_Le même monté sur pylone

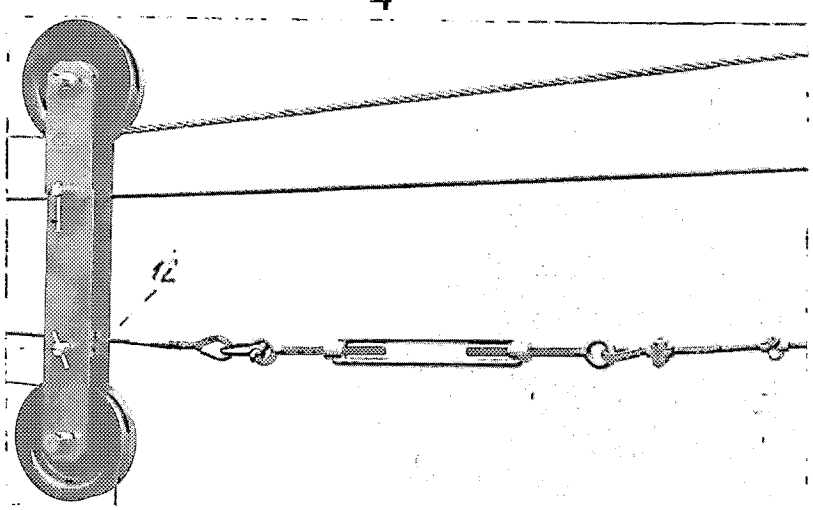
3_Treuil léger pour station téléphérique portable SK1

4_Chariot de translation pour saumon de 100 kg

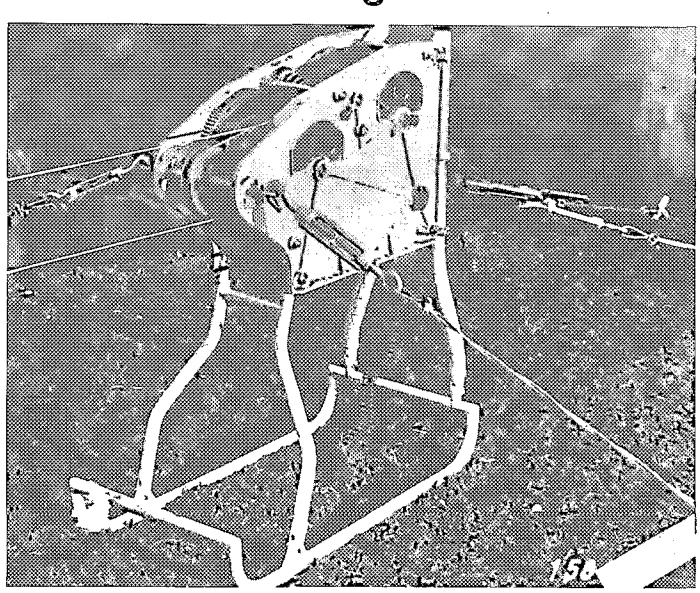
2



4

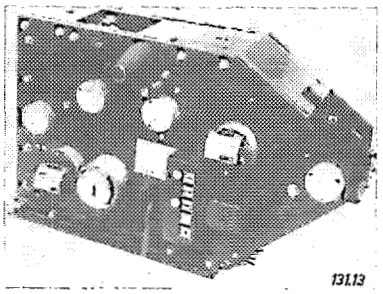


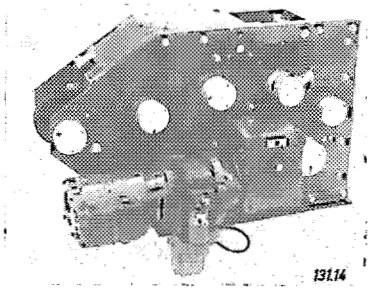
3



Photos OTT

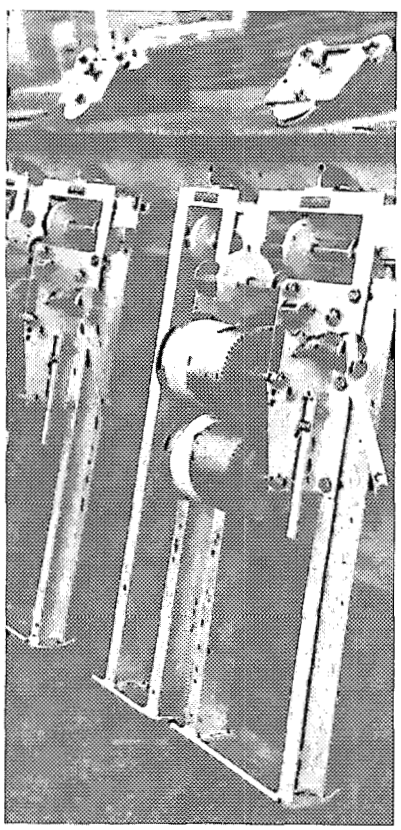
Planche XII suite



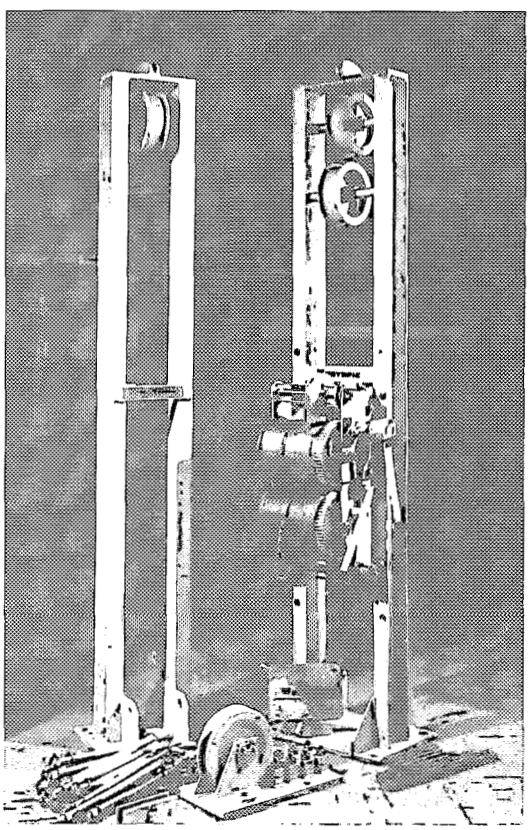


Photos OTT

Treuil double éléctrique OTT 100 kg



Photos Neyrpic

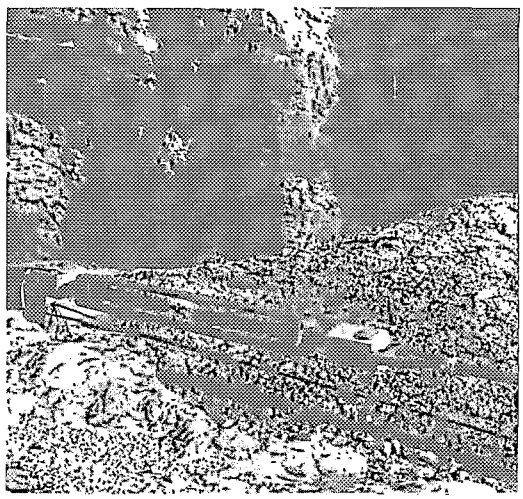


Télepherique portable Neyrpic
ref: 2445

Treuil double Neyrpic
(saumon 80 kg) réf: 2424 D

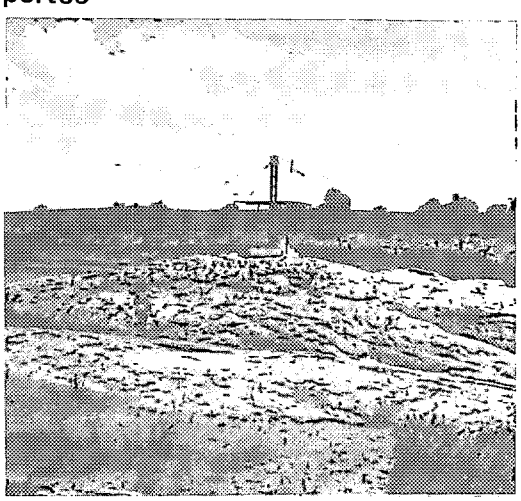
QUELQUES REALISATIONS DE L'O.R.S.T.O.M

Betsiboka à Ambodiroka 250m de portée

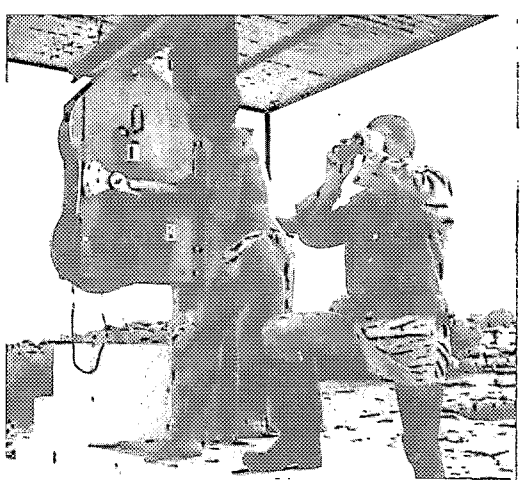


Ancrage rive gauche

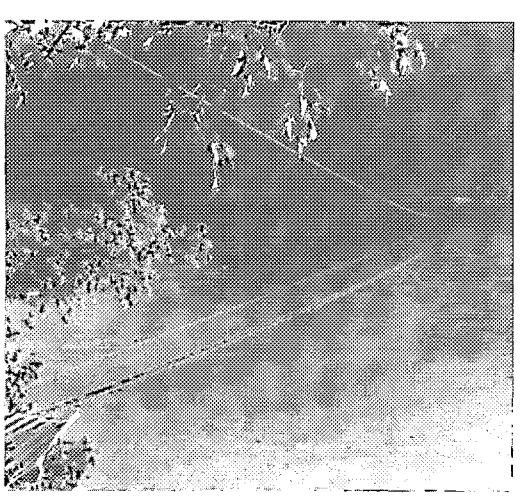
Ménarandra a Tranoroa 175m de portée



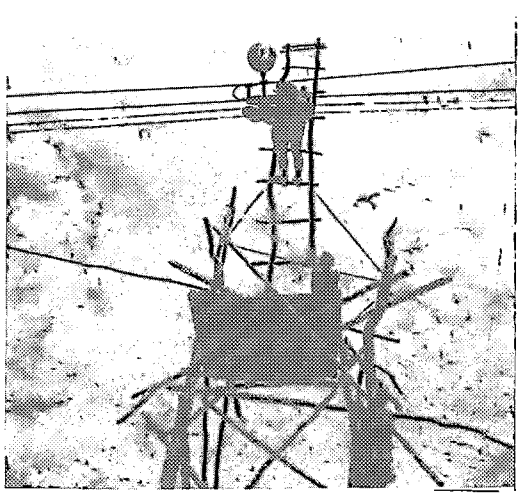
Jaugeage a Tranoroa



Mangoky au Banian 425m de portée



Mangoky au Banian montage des poulies de renvoi au milieu de la portée



Les éléments constitutifs d'une station téléphérique sont les suivants (voir figure 30) :

- le treuil double,
- les câbles porteurs et tracteurs,
- le câble électroporteur,
- les ancrages et supports de câbles et de treuil,
- l'abri.

La mise en place d'une station téléphérique est une opération délicate. Les techniques utilisées et les différents calculs relatifs aux câbles sont exposés en détail dans un cahier d'hydrologie de l'ORSTOM auquel nous renvoyons le lecteur ayant à réaliser ce travail.

Nous donnons en annexequelques tableaux et abaques relatifs aux calculs des tensions des câbles.

Le principe de fonctionnement d'une station téléphérique est le suivant : le câble porteur de grosse section, supporte l'équipement de mesure par l'intermédiaire d'un chariot roulant sur ce câble. Ce chariot est manoeuvré depuis la berge par un câble tracteur actionné par un treuil double avec lequel il est possible de déplacer également le saumon suivant les verticales choisies. Des compteurs donnent les abscisses et les ordonnées du moulinet. Les treuils sont soit manuels, soit électriques.

L'avantage de ces installations réside dans le fait que les opérateurs réalisent la mesure depuis la berge. Les vitesses mesurées sont importantes, supérieures à 4 et même 5 m/s.

Le coût de ces installations étant assez élevé, il s'ensuit que leur utilisation ne se justifie, le plus souvent, que pour les études d'aménagements importants (Mangoky, Ikopa, Betsiboka à Madagascar, Kouilou au Congo, etc...) ou sur les rivières très dangereuses en crue (oueds d'Afrique du Nord).

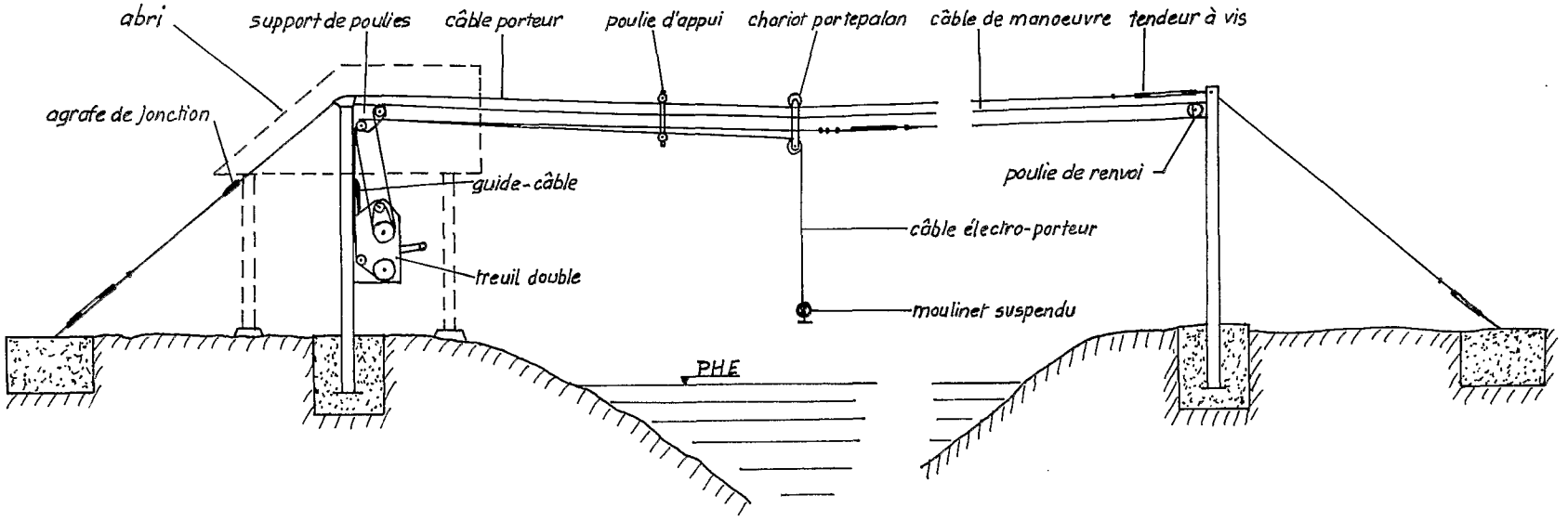

abri
support de poulies
câble porteur
poulie d'appui
chariot portepalan
câble de manoeuvre
tendeur à vis
agrafe de jonction
guide-câble
poulie de renvoi
câble électro-porteur
treuil double
moulinet suspendu
PHE

Fig.30

La plus grande station téléphérique installée par l'ORSTOM est celle du Mangoky au Banian dont la portée entre appuis atteint 425 m. De telles portées posent quelques problèmes pour la manoeuvre du saumon (poulies de renvoi au milieu de la portée et treuils de commande sur les deux berges);aussi la largeur maximale équipée avec le matériel courant n'excède que très rarement 250 m.

II. 4. MATÉRIEL DIVERS

Nous examinerons ici quelques accessoires utilisés lors des mesures de vitesses au moulinet et destinés à la détermination de la largeur de la rivière et la mesure des angles horizontaux et verticaux....

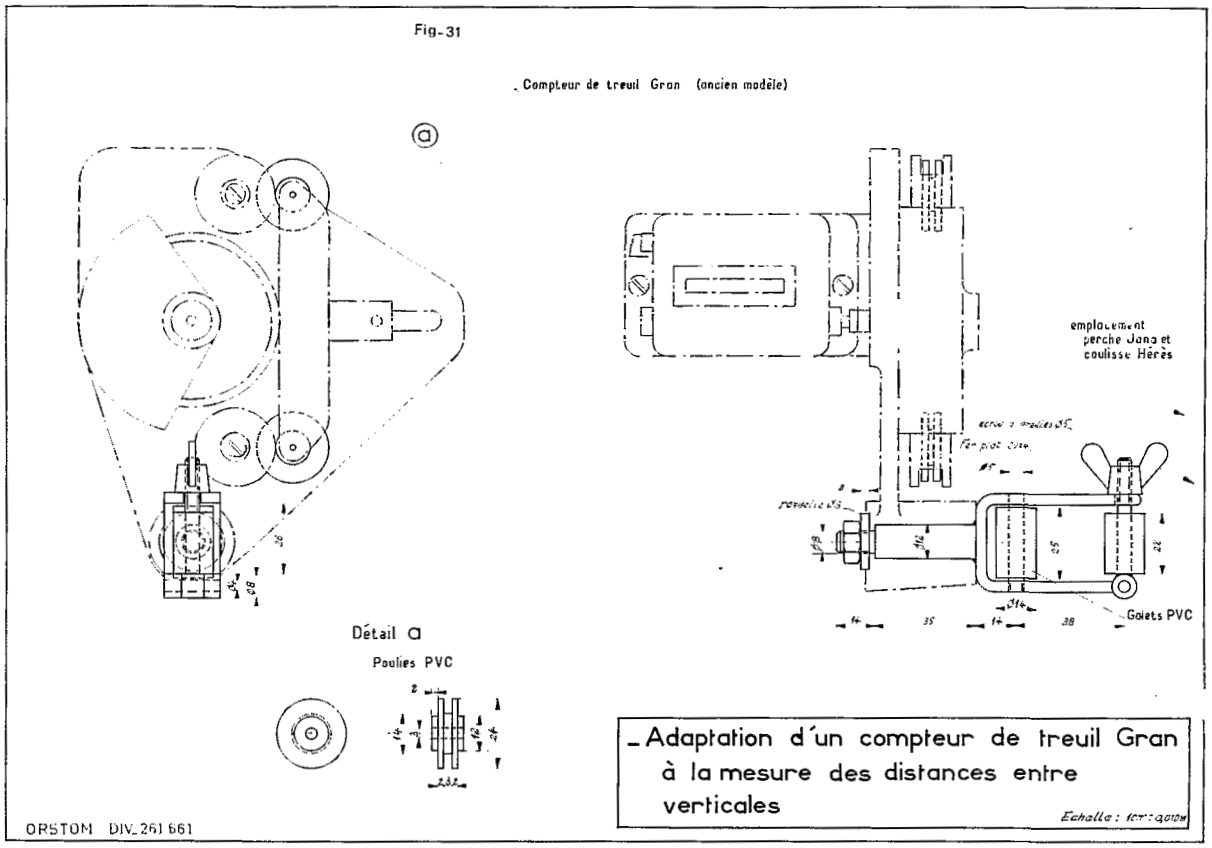
Ces accessoires sont, le plus souvent, "bricolés" par l'hydrologue et nous sommes persuadés que notre énumération est incomplète.

II. 4. 1. DÉFINITION DE LA SECTION

II.4 1 1. Avec perche fixe (jaugeage à gué)

La section est matérialisée par un double décamètre tendu entre deux piquets dans le cas d'une rivière peu importante.

On peut utiliser aussi un câble d'acier inoxydable de 2 mm sur lequel on déplace un compteur à chiffres sauteurs avec roulette donnant les centimètres. Nous avons utilisé le compteur du treuil GRAN, ancien modèle modifié pour être rendu solidaire d'une perche tout en roulant sur le câble (voir figure31). Cette solution est relativement onéreuse. Il est possible de réaliser facilement et à peu de frais, un montage semblable à l'aide de compteurs équipés de roulettes et de remise à zéro par levier (compteur type M 102) vendus par la Société IVO Compteurs à Strasbourg.



. Adaptation d'un compteur de treuil Gran à la mesure des distances entre verticales

Echelle : 1/1

A la limite, un câble gradué tous les mètres peut également définir la section en travers.

II.4 1 2. Avec cyclopotence, porte-à-faux sur véhicule ou perche mobile sur passerelle

Un décamètre, placé sur le pont ou la passerelle, permet de définir les abscisses. On peut aussi repérer les positions des différentes verticales par des traits à la peinture. Dans ce cas, on doit définir l'origine par rapport à un repère fixe et porter ces renseignements dans le dossier à la station.

II.4 1 3. Avec bateau

II.4 1 3 1. Largeur de rivière inférieure à 300 m

Dans ce cas, on utilise un câble d'acier de 3 mm (type aviation ou inoxydable) monté sur un treuil d'applique de 500 kg type "TAL" des Etablissements VERLINDE. Ce treuil possède un système de démultiplication, de débrayage du touret et un frein. Il peut recevoir jusqu'à 500 m de câble de 3 mm. Le brin libre du câble est équipé d'un mousqueton ou d'une manille pour fixation rapide sur le support berge opposée. Le treuil est fixé sur la rive à l'aide de deux barres à mines au droit de la section choisie.

Si l'on dispose du chariot de translation décrit précédemment, le câble n'a pas besoin d'être gradué, les verticales seront repérées à l'aide du compteur. Dans le cas contraire, il faut graduer le câble tous les deux mètres avec des marques indélébiles de couleurs différentes pour les mètres et les dizaines de mètres.

Utilisé avec précaution par une équipe entraînée, cet équipement permet la matérialisation des sections jusqu'à 300 m de large avec des vitesses ne dépassant pas 3 m/s.

Certains hydrologues préfèrent utiliser la cordelette tressée en nylon de 4 mm qui flotte sur l'eau et qui paraît, de ce fait, plus facile à mettre en place. Elle présente en réalité plusieurs inconvénients : grande élasticité, d'où erreur sur la mesure de la largeur (pouvant cependant être diminuée en prenant quelques précautions) et flèche importante dans le plan horizontal sous l'effet de la poussée du courant sur le bateau, utilisation difficile et même impossible du chariot de translation.

Personnellement, nous avons utilisé le câble acier pendant plus de vingt ans, nous avons fait des essais avec la cordelette de nylon et nous continuons à penser que le câble acier, manipulé avec le matériel adéquat, reste le meilleur pour matérialiser les sections de jaugeages non permanentes sur les grandes rivières.

II.4_1_3_2. Largeur de rivière supérieure à 300 m

Pour repérer les verticales et maintenir le bateau dans la section, il faut disposer du matériel suivant :

- 1 ancre dont le poids est choisi en fonction de la dimension du bateau, de la nature du fond et de la vitesse du courant,
- 1 chaîne, la plus longue possible, car la chaîne intervient autant, sinon plus que l'ancre dans la stabilité du bateau,
- des balises installées sur les berges.

Ces balises doivent matérialiser une section transversale et permettre de définir la position du bateau. On peut utiliser des panneaux triangulaires équilatéraux de 1 m de côté, rouges sur fond blanc, inversés pour définir l'alignement. Pour la position, on utilisera des panneaux rectangulaires de 1 m x 2 m blancs, des marques sur les arbres,s'il en existe de suffisamment grands ou des repères naturels bien visibles du milieu de la rivière. Toutes les balises doivent être relevées avec précision sur un plan à l'échelle. On essaiera, dans la mesure du possible, de placer sur chaque berge, les balises de position sur un axe perpendiculaire à la section matérialisée par les balises triangulaires. La longueur du balisage sur les berges sera de l'ordre de deux fois la largeur de la rivière.

- Un cercle hydrographique.

Le cercle hydrographique est un appareil qui permet de mesurer l'angle horizontal sous lequel on voit deux repères. Le principe de cet appareil est basé sur la double réflexion des rayons lumineux sur deux miroirs, l'un fixe, l'autre mobile monté sur l'alidade, (figure 32). L'opérateur voit dans le champ de la lunette deux images :

. dans le demi-cercle supérieure l'image directe du repère A,

. dans le demi-cercle inférieure l'image du repère B qui a subi une double réflexion sur les miroirs mobiles et fixes.

Lorsque les deux images coïncident, on peut lire l'angle, à l'aide du vernier , sur le limbe gradué.

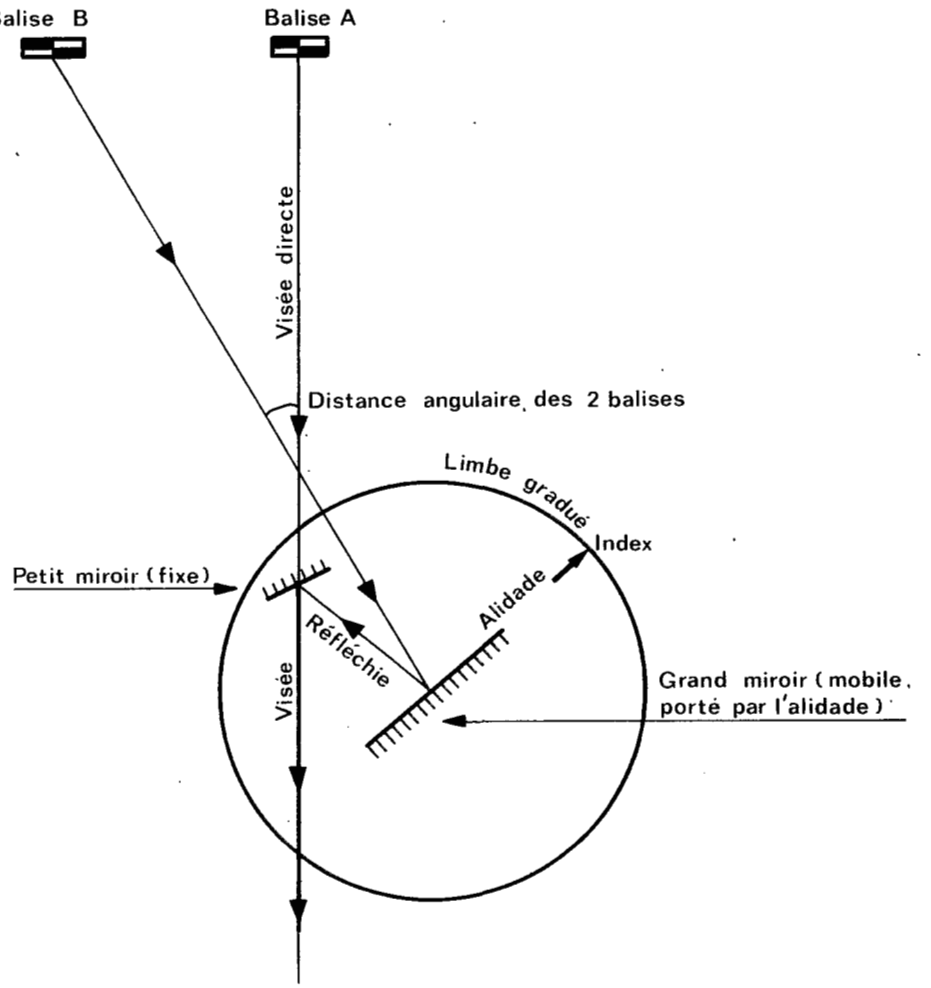


Fig-32 Cercle hydrographique . Schéma de principe

O.R.S.T.O.M. Service Hydrologique	date	des.	
	4-75	D-JP	

Le cercle le plus utilisé actuellement est le cercle LEFEVRE-POULIN, représenté sur la figure 33. Le limbe de ce cercle comporte une graduation en degrés de 0 à 180° (blanche) suivie d'une graduation de 180 à 80° (jaune). Il permet de faire des visées à 180°, c'est à dire de vérifier l'alignement de trois points (deux balises et l'opérateur placé entre les deux). Avec ce type de cercle, la visée directe se fait toujours sur la balise située à droite par rapport à l'opérateur, et c'est l'image de la balise située à gauche qui est amenée en coïncidence en manoeuvrant le miroir mobile à l'aide de l'alidade . Si l'on fait l'inverse (visée directe sur la balise gauche) l'index de l'alidade tombe dans la zone du limbe où il n'y a pas de graduation, d'où lecture impossible. Il existe également un cercle LEFEVRE-POULIN, comportant une graduation blanche de 0 à 160°, et une graduation jaune symétrique de 0 à 160°. Ce type de cercle ne permet pas les mesures directes à 180°, mais par contre on peut indifféremment viser en direct la balise de droite ou de gauche ; les lectures seront faites soit sur la graduation blanche, soit sur la graduation jaune.

Dans ce qui suit, nous admettons que nous utilisons un cercle LEFEVRE-POULIN à 180°. Cet appareil est très précis ; il permet de mesurer les angles à une minute près. Le cercle est livré avec les accessoires suivants :

- viseur,
- lunette de galilée, donnant une image droite,
- deux équerres de réglage du grand miroir,
- une broche ou clé de réglage,
- écrans solaires,
- miroir de rechange.

Des appareils plus coûteux que le cercle, mais d'un maniement plus aisé et permettant un dépouillement plus rapide peuvent parfois se trouver à la disposition des hydrologues. Ce sont :

- les télémètres de précision,
- les théodolites ou tachéomètres.

Ils permettent le relevé de la position du bateau à partir d'un alignement perpendiculaire à l'axe de la rivière, matérialisé par trois balises.

Pour relevés de 0 à 180°

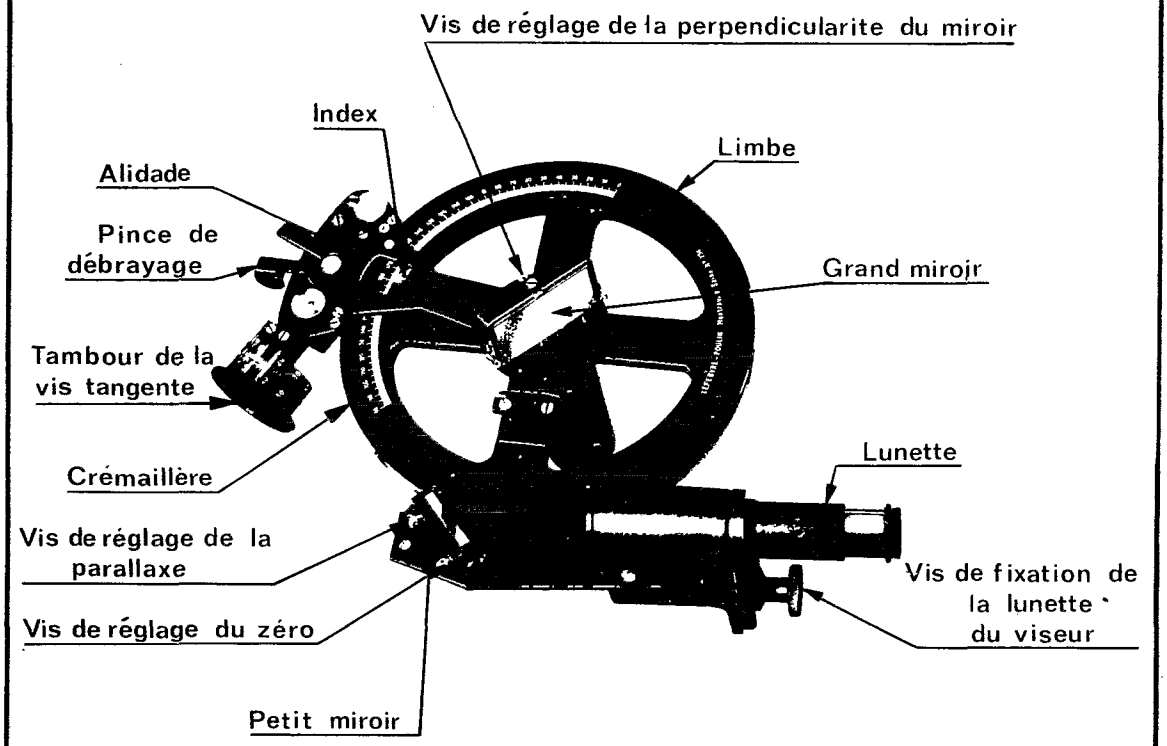


Fig-33 CERCLE HYDROGRAPHIQUE

Avec le télémètre, l'abscisse de chaque verticale est obtenue directement en visant une balise ou un repère sur la berge. Avec les télémètres optiques, la mesure n'est possible qu'au-delà d'une certaine distance 30 ou 50 m : près de la berge, rive droite, on visera la balise rive gauche et inversement.

Notons que des télémètres électroniques à rayons infrarouges ou à laser apparaissent actuellement sur le marché : ils sont précis, d'une maniement facile, mais d'un prix élevé qui ne permet pas d'envisager leur utilisation en hydrométrie, pour la seule mesure des distances sur grandes rivières.

Le théodolite, placé en station ou sur une berge, donnera la position du bateau sur l'alignement définissant la section par une mesure d'angle.

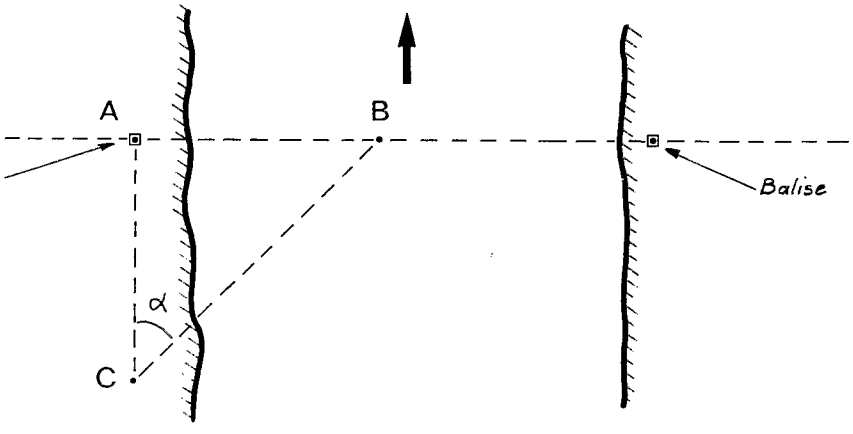


Fig. 34

L'appareil, placé en C, de telle façon que AC soit perpendiculaire à AB donne l'angle α pour chaque position du bateau situé en B (figure 34). On a :

$$AB = AC \, tg\alpha$$

Avec un peu d'habitude , l'opérateur en C peut prédéterminer les valeurs de α et les afficher sur l'appareil, afin de diriger les opérations d'ancrage du bateau pour obtenir une bonne répartition des verticales sur la section. La base AC doit être suffisamment grande (de l'ordre de la 1/2 largeur de la section), pour avoir une bonne précision au voisinage de la berge opposée.

II. 4. 2. MESURE DES ANGLES

Nous distinguerons les angles dans le plan horizontal et les angles dans le plan vertical. Pour les premiers, il s'agit soit de l'angle que fait la section de jaugeage avec la direction du courant, dans le cas d'une mesure à partir d'un pont non perpendiculaire à l'axe de la rivière par exemple, soit de l'angle que fait le saumon par rapport à la section de jaugeage sous l'action d'un courant oblique.

Cet angle intervient dans le calcul de la vitesse vraie dans la section.

Dans le plan vertical, il s'agit de l'angle entre le câble électroporteur et la verticale passant par le point de suspension sous l'action de la poussée du courant (angle de traînée ou de dérive). La connaissance de cet angle permet d'apporter une correction à la profondeur mesurée avec le compteur (vérification avec profil en travers topographique ou à sondeur ultra-son).

II.4 2 1. Angles horizontaux

Section oblique

L'angle que fait la section avec la direction du courant est souvent estimé à l'oeil. La précision est généralement suffisante. Si on tient à une meilleure précision, on peut utiliser un appareil topographique avec cercle horizontal gradué.

Cet angle est mesuré une fois pour toutes dans le cas de jaugeages, à partir d'un pont oblique.

Angle du saumon

Cette mesure n'est possible que si les opérateurs sont placés au-dessus du saumon (jaugeage à partir d'un pont ou d'un bateau), ou si l'on dispose d'un appareil télétransmetteur d'angle, ce qui est très rare, dans le cas de jaugeages à partir d'une traille téléphérique.

Disons tout d'abord que si les angles restent inférieurs à 15°, l'erreur commise sur le débit est négligeable. Ajoutons que cet angle n'est facilement mesurable qu'en surface et sur des rivières calmes ; par forte crue, le saumon se déplace souvent un peu dans tous les sens et les grosses erreurs commises sur la valeur du débit ont des causes autres que les angles horizontaux... De plus, dans ce cas, il n'est pas du tout sûr que l'angle soit le même en surface et au sein de l'écoulement....

Dans le cas où l'opérateur est situé au-dessus du saumon (pont, bateau) et lorsque les conditions d'écoulement le permettent, on peut utiliser un rapporteur transparent, comme indiqué sur la figure 35.

Repérage de l'angle horizontal

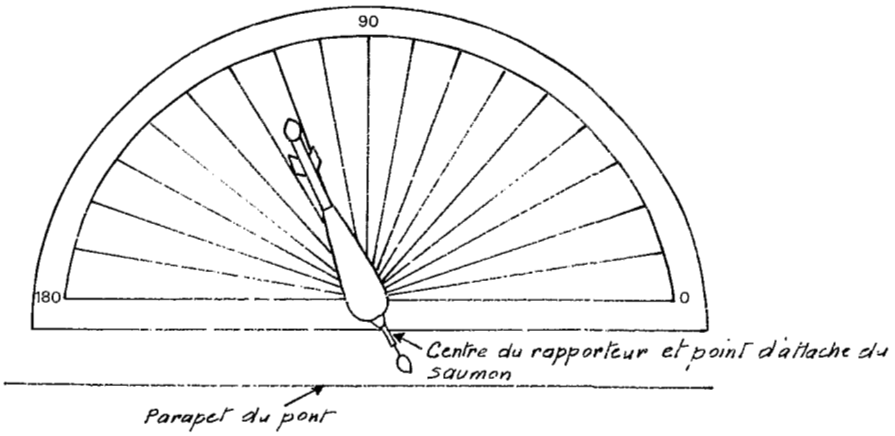


Fig. 35

On aligne la base du rapporteur avec le parapet du pont ou le câble matérialisant la section, en faisant coïncider le centre du rapporteur avec le point d'attache du saumon. L'axe du saumon donne l'angle du courant avec la section. On peut améliorer un peu la mesure en fixant sur le rapporteur deux réglettes : une fixe sur la base et une mobile autour du centre, qui sera amenée en coïncidence avec l'axe du saumon.

Dans le cas de mesures en eaux chargées, ou à partir de stations téléphériques, on ne peut pas estimer l'angle horizontal du saumon. Il existe des appareils donnant l'orientation du saumon : OTT fabrique une pièce médiane avec chambre à compas magnétique se plaçant entre le moulinet et le saumon et donnant l'angle du courant par rapport au Nord magnétique (voir notice HBf 10.050 page 12). Il existe également d'autres appareils transmettant l'angle horizontal et vertical du courant grâce à deux rhéostats de précision placés l'un verticalement, l'autre horizontalement, préalablement étalonnés et actionnés par une tige équilibrée munie d'un gouvernail. Ces appareils ont besoin de plusieurs conducteurs pour leur alimentation, la transmission de l'information et l'erreur introduite sur la mesure de la profondeur est plus grande que l'erreur commise en négligeant l'angle d'orientation.

Electricité de France a mis au point un dispositif de transmission par variation de fréquence à partir du câble électroporteur à un conducteur, la fréquence étant fonction de l'angle du saumon par rapport à une boussole ou compas magnétique. Ce système n'a pas donné les résultats escomptés.

En résumé, le choix de la section doit être fait, au départ, de telle manière que les angles horizontaux du saumon restent dans des limites acceptables afin de négliger les erreurs qu'ils introduisent.

II.4 2 2. Angles verticaux

Avec certaines cyclopotences, ou le porte-à-faux pour équipement léger au bateau, cet angle est mesuré directement grâce à un rapporteur placé près de la poulie de suspension.

Dans le cas où il n'y a pas de rapporteur ou lors d'un jaugeage avec une station téléphérique, on peut utiliser un rapporteur transparent, muni d'un fil à plomb, fixé au centre. A partir de la berge, on essaye de faire coïncider au mieux la base du rapporteur avec le câble électroporteur, l'angle de dérive est lu en face du fil du pendule (figure 36).

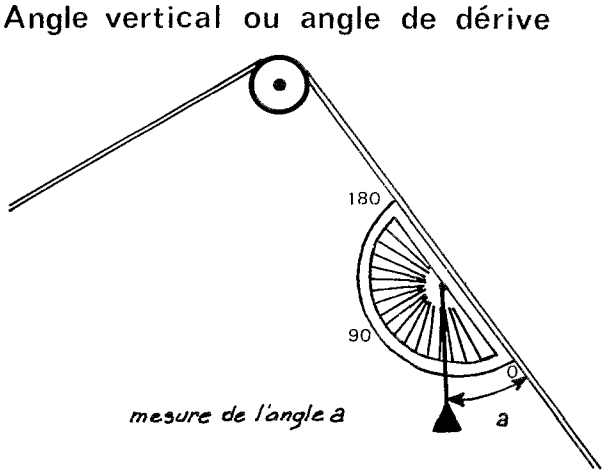


Fig. 36

II. 4. 3. CABLE DE RETENUE ET CABLE AMONT

Dans le cas de jaugeages à partir d'une station téléphérique, ou d'un pont avec cyclopotence ou porte-à-faux, il est possible de diminuer la valeur de l'angle de dérive en utilisant un câble de retenue. Ce montage permet de contrôler la trajectoire du moulinet et de le maintenir à peu près sur une verticale.

En amont du pont ou de la station téléphérique, on installe un câble, parallèlement au pont ou au câble porteur, à une distance L = 5 à 6 fois la profondeur maximale de la rivière au droit de la section de mesure. Ce câble, appelé câble amont, aura un diamètre de 6 mm et sera placé avec une flèche aussi réduite que possible à un mètre environ au-dessus des plus hautes eaux. Sur ce câble, se déplacera une poulie à laquelle sera fixé le câble de retenue. La longueur de ce câble est mesurée à l'étiage, de façon que le saumon, attaché au câble de retenue, décrive une trajectoire très peu différente de la verticale (voir figure 37).

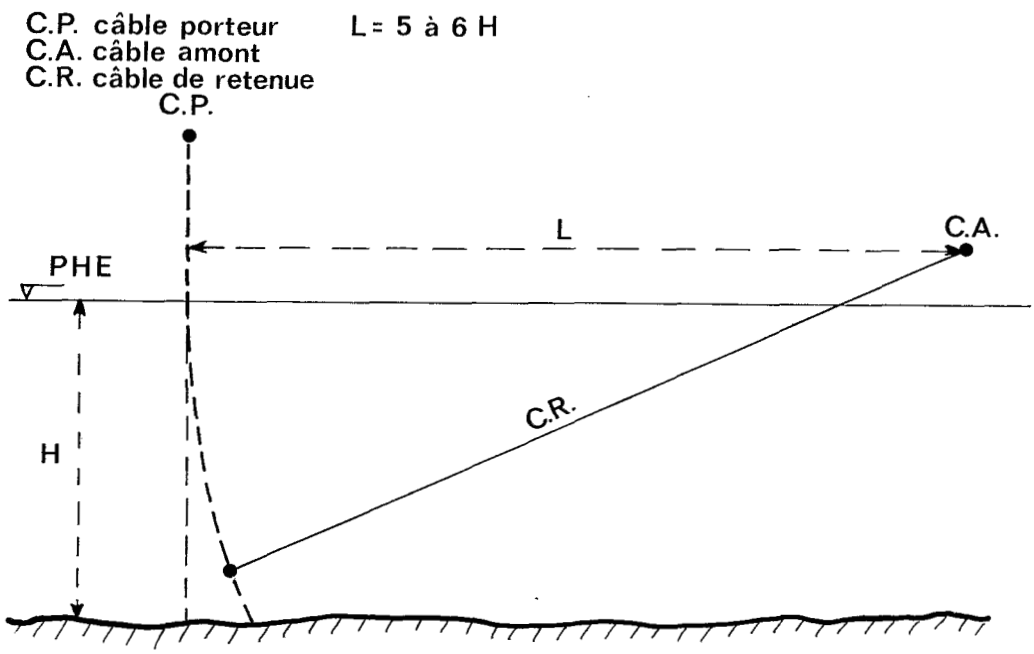
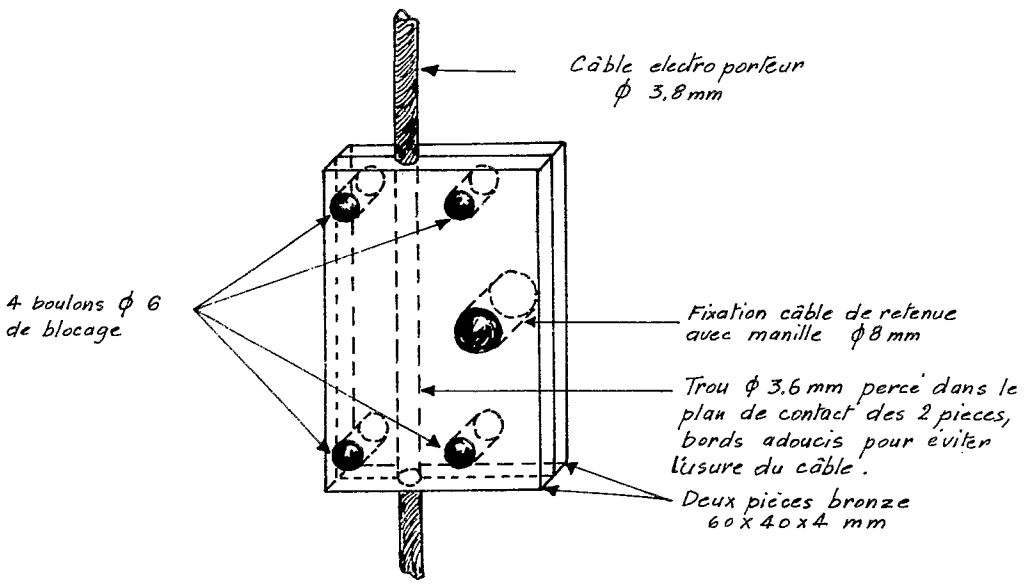


Fig_37

Le câble de retenue aura un diamètre de 4 mm. Il est fixé à 50 cm au-dessus du saumon grâce à une pièce de serrage qui peut avoir la forme indiquée sur le croquis ci-dessous (figure 38).


Câble electro porteur
ϕ 3,8 mm
4 boulons ϕ 6
de blocage
Fixation câble de retenue
avec manille ϕ 8 mm
Trou ϕ 3,6 mm percé dans le
plan de contact des 2 pieces,
bords adoucis pour éviter
l'usure du câble.
Deux pièces bronze
60 x 40 x 4 mm

Croquis de pièce de fixation du câble de retenue

Fig. 38

Pour que le fonctionnement soit correct, il faut que L soit grand par rapport à H et que le câble amont soit placé plus bas que le câble porteur.

L'inconvénient de cette installation est d'apporter une légère complication aux manoeuvres et d'augmenter les risques d'accrochage de branches et de corps flottants.

Par forte vitesse supérieure à 4 m/s, le câble de retenue permet par contre, une meilleure immersion du saumon.

Des installations de ce type existent en Algérie et au Maroc. Les résultats obtenus ne sont pas toujours très satisfaisants. Ceci provient du fait que la distance L est souvent trop petite, que les herbes et branchages transportés en surface se concentrent le long du câble de retenue entraînant, lorsque la fixation est faite sur la manille du saumon, un blocage de l'hélice. De ce fait, certains hydrologues abandonnent ce système.

Malgré cela, nous pensons que le câble amont doit être installé chaque fois que c'est possible. De meilleurs résultats seront obtenus par fortes vitesses avec des transports en surface peu importants : attendre la fin de la montée et faire la mesure après la période étale, les branchages et débris divers seront moins nombreux. C'est à l'opérateur de décider en fonction de l'état de la rivière et de son expérience, s'il doit ou non utiliser le câble de retenue.

Un autre avantage non négligeable du câble de retenue, est qu'il évite la perte définitive du matériel en cas de rupture du câble électroporteur.

II. 4. 4. AUTRES ACCESSOIRES

Nous citerons sans entrer dans le détail, les groupes électrogènes portatifs pour l'éclairage pendant les jaugeages de nuit ou l'alimentation de certains équipements, et les sondeurs à ultrasons. Il en existe de très nombreux modèles et les technologies modernes offrent des appareils robustes et fiables sous un volume très réduit permettant leur utilisation même sur des embarcations relativement modestes. Malheureusement, ces matériels restent d'un prix encore très élevé et de ce fait, leur utilisation en hydrométrie est assez peu fréquente.

II. 5. DOCUMENTATION ET FICHIER DU MATÉRIEL

Nous donnons en annexe les adresses des principaux fabricants de matériel hydrométrique. L'ingénieur, chargé d'un service hydrologique, peut obtenir des constructeurs, la documentation relative aux différents matériels, en général les fiches publicitaires sont expédiées gracieusement aux services qui en font la demande.

La documentation, dans un service hydrologique, se présentera sous deux formes :

- d'une part l'ensemble des fiches publicitaires éditées par les constructeurs et tenues régulièrement à jour (les modifications sont généralement très nombreuses) par envoi automatique des fiches relatives aux nouveaux appareils ou aux modifications éventuelles. Il ne faut pas hésiter à relancer très souvent les fabricants et leur rappeler qu'on fait partie de leurs clients potentiels.

Ces fiches sont rassemblées, classées et répertoriées à la bibliothèque du service. Les ingénieurs et les techniciens peuvent les consulter à tous moments et il est, de ce fait, inutile d'en faire des photocopies.

Certains constructeurs n'indiquent pas de façon claire la date de parution de leurs fiches publicitaires : seuls figurent des numéros de code. Dès réception, il est conseillé de noter sur chaque fiche la date d'arrivée. Ceci est important car ces fiches donnent souvent les références des pièces détachées et, lors des commandes, il faut disposer de ces renseignements pour éviter des erreurs.

- D'autre part, les notices d'emplois des appareils en service. Ces notices sont également conservées en bibliothèque, mais elles seront, dès réception, photocopiées pour constituer la documentation personnelle de chaque ingénieur ou technicien. Ces notices d'emploi sont fournies par les constructeurs lors de l'achat de tout appareil.

On peut inscrire sur chaque notice les numéros de référence des fiches publicitaires correspondantes ainsi que le numéro de série de l'appareil auquel elles se rapportent.

Cette documention, est en général, complétée par un fichier du matériel. Dès réception d'un appareil neuf, on établit une fiche sur laquelle sont portés les numéros de série, la date de réception, la référence des fiches publicitaires en documentation, l'affectation du matériel. Cette fiche comportera également la liste des pièces constituant l'appareil avec la référence exacte du constructeur.

On notera toutes les réparations et toutes les modifications apportées. Pour un moulinet, on peut également noter le nombre de jaugeages effectués ou le nombre d'heures de marche. Noter également les dates des réétalonnages et les formules correspondantes.

A l'aide du fichier matériel, le responsable d'un service hydrologique doit être en mesure de connaître rapidement, la quantité, l'état et la répartition entre les différentes équipes du matériel de mesure dont il dispose.

III. OPÉRATIONS SUR LE TERRAIN

III. 1. GÉNÉRALITÉS

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit le matériel utilisé pour la mesure des débits. Nous allons voir maintenant comment ce matériel sera mis en oeuvre sur le terrain. Nous donnerons, d'abord, quelques consignes pour une utilisation correcte et un bon entretien de ce matériel. En effet :

Il est impossible de faire de bonnes mesures avec un matériel mal utilisé ou en mauvais état de fonctionnement.

Ensuite, nous énoncerons un certain nombre de règles générales valables pour toutes les méthodes de jaugeage : choix des sections de mesure, du mode opératoire et du matériel. Viendront ensuite quelques règles particulières liées au mode opératoire.

Précisons tout de suite que nous ne prétendons pas donner des règles universelles s'appliquant infailliblement, à toutes les situations. En effet, chaque jaugeage est presque toujours un cas particuliers et l'hydrométriste connaissant parfaitement les principes de base, doit toujours faire preuve d'initiative et d'esprit critique pour les appliquer au mieux en fonction des conditions locales. Malgré sa simplicité apparente, la mesure des débits au moyen de moulinets est une opération parfois délicate qui demande un sens constant de l'observation et un grand souci de minutie.

Disons avec J.A. RODIER que ces "mesures doivent être menées intelligemment car elles requièrent beaucoup plus de compétence, de jugement et d'imagination qu'on ne le pense".

Nous voudrions également faire remarquer que, dans la plupart des pays et particulièrement en Afrique, le prix du déplacement du personnel et du matériel intervient pour une très large part dans le coût total d'une mesure de débit. Aussi, lorsque l'hydrologue est à pied d'oeuvre, il doit s'appliquer à réaliser la mesure dans les meilleures conditions, en prenant le temps, même dans le cas de variations lentes du plan d'eau, de faire plusieurs jaugeages successifs. En cas de crue violente, l'immersion du saumon et du moulinet pose toujours quelques problèmes, mais une fois que les appareils sont dans l'eau il n'est pas beaucoup plus difficile et pas tellement plus long de faire des mesures complètes sur les verticales que quelques points aux 6/10 ou aux 2/10 et 8/10 de la profondeur.

En général, et ceci est vrai dans toutes les régions du globe, une rivière en crue charrie de nombreux débris flottants en surface pendant la période de montée des eaux. Après le maximum de la crue, la surface du plan d'eau devient de plus en plus nette et, dans la mesure du possible, il vaudra mieux attendre ce moment pour commencer le jaugeage : l'immersion du moulinet présentera moins de risques. Pendant la phase ascendante de la crue, il est possible d'utiliser les corps flottants pour réaliser quelques mesures de vitesses en surface.

Les conditions idéales pour réaliser une bonne mesure ne sont pratiquement jamais réunies. On doit, le plus souvent, se contenter de ce qui existe et opérer en tenant compte des difficultés qui se présentent sur le terrain : variation très rapide des débits dans le temps, charriages importants pendant les crues aussi bien en suspension qu'en surface, irrégularité très grande des vitesses (au même instant en grandeur et en direction et pour une section donnée en fonction de la saison : vitesses très fortes en crue et pratiquement nulles à l'étiage).

De ce fait, la précision que l'on peut espérer au cours d'une mesure de débit est de l'ordre de 5 % dans les très bonnes conditions : écoulement régulier, section correcte... Il ne faut

pas espérer obtenir mieux que 10 % dans le cas d'écoulement torrentiel avec variation très rapide du plan d'eau.

Il ne faut jamais oublier d'harmoniser les précisions des différents éléments entrant dans l'exécution des mesures. On voit, en effet, très fréquemment des jaugeages exécutés de manière assez sommaire (faible nombre de points de mesures, verticales peu nombreuses ou mal réparties) et dont le dépouillement est conduit avec un luxe de précision tel que le résultat final présente une précision apparente très supérieure à celle qu'on pourrait attendre des relevés.

Toujours au sujet de la précision, soulignons que l'introduction du calcul automatique en hydrologie doit inciter les hydrométristes à opérer avec le plus grand soin car l'ordinateur ne donne des résultats corrects qu'en fonction de la qualité des données qui y sont introduites.

En effet l'utilisation de programmes savants et très élaborés à partir de mesures peu précises, conduira fatalement à des résultats entachés de grossières erreurs très souvent plus importantes que les erreurs commises sur les mesures mêmes.

La mesure sur le terrain restera donc encore pendant longtemps la base de l'hydrologie scientifique ; aussi, faut-il éviter de la considérer comme une tâche bassement matérielle, dénuée d'intérêt, et chercher constamment à la réaliser dans les meilleures conditions en notant soigneusement les moindres détails, même ceux qui paraissent évident car une fois la crue ou l'étiage passé, il est difficile et pratiquement impossible de récupérer ou de contrôler des renseignements oubliés ou erronés. En hydrométrie, les évènements exceptionnels sont rares, difficiles à observer et une fois qu'ils sont passés, seules les notes et les mesures bien faites permettent leur reconstitution et leur analyse.

III. 2. RÈGLES GÉNÉRALES VALABLES POUR TOUTES LES MÉTHODES

III. 2. 1. ENTRETIEN DU MATÉRIEL

Les instruments utilisés en hydrométrie et particulièrement les moulinets, sont des appareils de précision conçus pour introduire dans la mesure des erreurs négligeables lorsqu'ils sont en bon état et utilisés correctement.

Ce matériel doit être manipulé avec soin, aussi bien au cours des mesures que pendant le transport. Après chaque campagne, l'hydrologue doit remettre son matériel en état de marche, afin qu'il soit immédiatement disponible pour une intervention rapide.

Il est conseillé de donner à chaque équipe de jaugeurs un lot de matériel dont elle sera responsable et avec lequel elle devra exploiter les stations dont elle a la charge. Ce lot comprendra en plus du matériel hydrométrique proprement dit, une caisse d'outillage contenant les outils classiques (clefs, tournevis, pinces, etc...) et les clefs spéciales pour le dépannage du matériel de jaugeage, de l'huile fluide en quantité suffisante, de l'huile épaisse pour les chambres de contact et le graissage des paliers des treuils, des accessoires et des pièces de rechange, telles que : axes, roulements, roues dentées, fils électriques, fiches ordinaires et spéciales (câble électroporteur), bougies pour le moteur hors-bord, ruban isolant, quelques serre-câbles, et.... le rouleau de fil de fer qui est toujours d'un grand secours dans les situations les plus désespérées.

En général, il vaut mieux disposer de deux moulinets et de deux compteurs d'impulsions. Prévoir également une lampe de poche qui peut, dans certains cas, remplacer, après un bricolage simple, le compteur défaillant. Les moulinets auront deux ou plusieurs hélices de pas différents, numérotées et dont les formules de tarage seront inscrites de façon très lisible sur la boîte du moulinet.

Tout ce matériel sera correctement emballé dans des caisses spéciales ayant chacune leur place dans le véhicule utilisé pour les déplacements. Ce véhicule pourra être aménagé en fonction des

moyens dont on dispose de façon à ce que le matériel soit disposé rationnellement, facilement accessible à l'arrivée au point de mesure tout en étant parfaitement arrimé pendant le transport.

III.2 1 1. Moulinets

L'huile de l'hélice sera jetée à la fin de chaque mesure et les pièces nettoyées correctement avec de l'essence. On stockera l'hélice sans huile jusqu'au prochain jaugeage.

Ne pas oublier de mettre de l'huile neuve avant chaque mesure

Les moulinets ne comportant pas de roulements (Neyrflux) seront simplement nettoyés à l'eau.

Avant chaque jaugeage, il faut contrôler l'état du moulinet : hélice endommagée, axe faussé, rotation correcte. Attention, avec les hélices en plastique, il est assez difficile de vérifier que le moulinet tourne correctement en le lançant à la main du fait de la faible inertie (particulièrement sur le moulinet Neyrflux). Un essai de rotation à la main révèlera toujours les frottements importants dus à la présence de grains de sable.

Un moulinet en bon état tourne sous l'action d'un courant d'air très faible (en soufflant sur l'hélice parallèlement à l'axe). Cependant, on doit éviter de laisser tourner un moulinet dans un vent très fort ou suspendu au saumon sur un bateau en marche, on risque ainsi de détériorer le système de contact.

Dans le cas de moulinets équipés d'hélices en bronze, ayant une inertie assez grande, il existe une méthode simple permettant de détecter les défauts de fonctionnement éventuels[1].

Dès réception d'un moulinet neuf ou réétalonné, on établit une fiche de contrôle d'état de moulinet et on procède à un essai de rotation. Le moulinet est fixé à un support horizontal. On lance l'hélice à la main et on déclenche deux chronomètres et un compteur d'impulsions. Un chronomètre est arrêté lorsque le compteur affiche 10 ou 50 tours suivant le type de moulinet, et l'autre à l'arrêt total de l'hélice. Faisant cette opération pour différentes forces de lancement et en portant sur du papier millimétré les deux temps ainsi mesurés : en abscisses t_2 temps mis pour s'arrêter et en ordonnée t_1 temps mis pour faire 10 ou 50 tours, on obtient une courbe. Si par la suite, un frottement excessif se produit, il sera décelé par la translation de la courbe vers des temps plus courts puisqu'il y aura freinage.

Une difficulté de cette méthode réside dans le fait que t_1 et t_2 sont relativement courts et ceci particulièrement avec les hélices en plastique. Un meilleur résultat sera obtenu en lançant le moulinet avec un petit moteur électrique dont l'axe est équipé d'un tampon en caoutchouc mis en contact avec le bout de l'hélice pendant un temps plus ou moins long.

---

(1) Méthode communiquée par M. HORST de l'International Courses in Hydraulic and Sanitary Engineering - DELFT (Hollande)

Pour terminer avec les moulinets, nous citerons quelques recommandations de la Norme Internationale ISO 2537-1974 :

"Le moulinet ne doit normalement être utilisé que dans la gamme de vitesses pour laquelle il a été étalonné. Cependant, il est permis d'extrapoler aux grandes vitesses à condition qu'il existe des données suffisantes pour le type de moulinet considéré...

Réétalonnage

Les moulinets étalonnés individuellement doivent être réétalonnés suivant les règles de routine ou au moins dès que leur fonctionnement peut être suspecté. En pratique, un réétalonnage est effectué une fois par an ou après 300 h d'emploi, en prenant en considération la plus faible des deux périodes.

Entretien - Examen - Pièces usées ou endommagées

Le moulinet doit être examiné avant et après chaque mesure de débit pour déceler les paliers usés ou endommagés, un mauvais alignement de l'arbre, le fonctionnement incorrect des points de contact, la déformation de la carcasse , de la roue à coupelles dans le cas d'un moulinet à coupelles ou de l'hélice dans le cas d'un moulinet à hélice. Après un entreposage d'assez longue durée, il convient de vérifier la lubrification des paliers du moulinet. Dans le cas d'un moulinet à hélice, afin de vérifier que le profil des pales n'a pas été déformé, utiliser un moule en plâtre ou un modèle métallique...

Nota : Certains moulinets ne nécessitent pas de lubrification.

Essai de rotation

L'essai de rotation est une méthode facile de vérification du fonctionnement du moulinet. Le fabricant doit spécifier la durée de l'essai de rotation que l'on doit obtenir pour chaque type particulier de moulinet. L'essai est effectué comme indiqué et dans les conditions recommandées dans la notice du fabricant, ou comme suit :

Le moulinet doit être correctement lubrifié, si nécessaire. Le moulinet doit être placé de façon que son arbre soit dans sa position normale de fonctionnement et que le rotor soit protégé des courants d'air.

Donner rapidement à la main une impulsion au rotor afin de commencer à le faire tourner.

La durée de rotation doit être chronométrée et notée.

Quand le rotor est sur le point de s'arrêter , son mouvement doit être soigneusement observé afin de voir si l'arrêt est brusque ou graduel. Si l'arrêt est brusque, la cause doit en être trouvée et corrigée avant l'emploi du moulinet.

De petites variations par rapport à la position normale de fonctionnement peuvent causer de grands écarts de la durée de rotation.

La durée minimale de rotation doit être consignée.

Nettoyage et lubrification

Après chaque mesurage de débit, ou plus fréquemment pour des mesurages espacés, toutes les surfaces des paliers doivent être soigneusement nettoyées et lubrifiées (y compris le pivot dans le cas de moulinets à coupelles). La même huile doit être utilisée pour l'étalonnage et les mesurages in situ ; cette huile doit remplir les caractéristiques recommandées par le fabricant.

Transport et entreposage

On doit prévoir une boîte convenable pour y entreposer le moulinet lorsqu'il n'est pas en usage. On doit aussi prévoir un emplacement convenable dans cette boîte pour y placer l'outillage nécessaire à l'entretien de l'instrument.

L'entreposage du moulinet dans sa boîte doit se faire de telle sorte qu'aucune pièce mobile ne supporte d'efforts. Pour les instruments dont la conception comporte un palier reposant sur un pivot,

le pivot et le palier doivent être placés séparément pendant l'entreposage et le transport. Lorsque la conception des paliers comporte des roulements ou des paliers lisses, on doit prendre soin que le rotor ne tourne pas lorsqu'il est posé dans la boîte.

Feuille de référence

Chaque moulinet doit être accompagné d'une feuille de référence sur laquelle est indiqué le détail de ses éléments constitutifs et des modifications qui lui ont été apportées."

.....

Les moulinets sont des instruments de précision. Ils doivent être manipulés avec soin, aussi bien au cours des mesures, que pendant le transport.

III.2 1 2. Compteurs

On veillera à disposer toujours de piles en bon état ou de batteries correctement chargées. Avoir, en réserve, un jeu de piles neuves. En cas de mesure par temps de pluie, protéger les compteurs à chiffres sauteurs qui sont très sensible à l'humidité et qui posent quelques problèmes. Stocker ces appareils sans les piles, après les avoir nettoyés et séchés. Vérifier de temps en temps le bon fonctionnement des commutateurs et contacts divers. Maintenir les câbles de liaison en bon état.

III.2 1 3. Treuils

Les treuils simples et doubles doivent être graissés aux paliers à intervalles réguliers. Les compteurs seront aussi nettoyés et graissés de temps en temps. Ne jamais graisser les systèmes de freinage des manivelles à frein automatique. Maintenir en bon état de propreté les bagues et balais pour la transmission des signaux.

III.2 1 4. Téléphériques

Un câble neuf s'allonge légèrement en cours d'utilisation. Il faut donc procéder à des vérifications correctes. Les câbles tracteurs seront toujours maintenus sensiblement parallèles au câble porteur.

Graisser régulièrement la poulie de renvoi. On l'oublie très souvent par suite de sa situation sur la berge opposée au treuil, de ce fait elle finit par ne plus tourner, ce qui entraîne une usure rapide du câble tracteur.

Graisser également les pas de vis des tendeurs.

Enrouler avec soin le câble électroporteur à spires jointives. Sur les treuils qui en sont pourvus, entretenir en bon état de fonctionnement l'appareil chargé de faire ce travail. Entre les mesures, le saumon ne doit jamais rester suspendu au câble électroporteur.

Il est bien évident que nous avons donné ci-dessus quelques consignes générales pour le matériel hydrométrique de base ; ceci ne veut pas dire qu'il faut négliger le reste : véhicule, hors-bord, cyclopotences, etc...etc... Notre objectif n'est pas de rédiger un manuel de mécanique générale.....

Ne jamais oublier qu'un manque d'entretien de l'un quelconque des éléments, du véhicule au moulinet, peut faire "rater" la mesure qu'on attend depuis longtemps pour préciser la courbe de tarage d'une station et provoquer ainsi un retard souvent important dans la connaissance des débits.

III. 2. 2. CHOIX DE LA SECTION DE MESURE

Nous ne donnerons pas ici les critères de choix d'une station limnimétrique : ceci a été développé en détail dans le tome 6 de ce manuel. Nous nous bornerons à donner quelques consignes pour la recherche et le choix de la section de jaugeage, section qui sera, dans la mesure du possible, définie à proximité immédiate de la station limnimétrique.

Les critères de choix d'une station limnimétrique et d'une section de jaugeage ne sont pas du tout les mêmes. Ils sont le plus souvent totalement opposés : il est en effet très rare de trouver un emplacement qui convienne parfaitement à la station limnimétrique et à la section de mesure. En général, il n'y a aucun inconvénient à choisir deux emplacements différents mais suffisamment voisins en s'assurant toutefois qu'il n'y a ni apports, ni fuites entre les deux.

Par ailleurs, il faut pouvoir mesurer correctement et avec la même précision relative les étiages, les eaux moyennes et les crues. Il est souvent très difficile de trouver une section qui donne de bons résultats pour tous les niveaux du plan d'eau.

On peut choisir des sections différentes mais pas trop éloignées pour la mesure des étiages et des crues, à condition qu'il n'y ait ni apports, ni fuites entre les deux emplacements et que le débit passant dans ces sections soit égal à celui contrôlé par la station limnimétrique.

La section de jaugeage sera située dans une zone où l'écoulement se fait à filets parallèles sans tourbillons importants, ni remous, ni zones d'eau morte.

Dans ce but, il y aura lieu de choisir l'emplacement de la section de jaugeage dans un tronçon rectiligne entre des berges franches, avec un lit bien calibré sur une distance au moins égale à cinq fois la largeur en amont et trois fois la largeur en aval. La qualité de l'écoulement sera appréciée simplement depuis la berge en observant le mouvement des débris et corps flottants.

Il est préférable d'avoir, au droit de la section, un tracé en plan du lit, légèrement convergent plutôt que divergent.

La section devra être, dans la mesure du possible, perpendiculaire aux filets liquides. Si cette condition ne peut pas être réalisée, on l'orientera de façon qu'elle soit normale aux filets liquides correspondant au maximum de débit.

Dans le profil choisi, il faut s'assurer que les vitesses extrêmes que l'on aura à mesurer restent bien dans les limites des formules d'étalonnage du moulinet employé. Il faut également que la vitesse la plus faible soit suffisante pour que le moulinet tourne dans de bonnes conditions ; les hydrologues Américains précisent que la vitesse la plus faible doit être supérieure à deux fois la vitesse de démarrage du moulinet.

Pour les basses eaux, on peut être amené à rectifier un peu la section d'écoulement en réalisant des digues ou en canalisant le courant. Il faut veiller à ce que ces modifications ne viennent pas perturber la cote à l'échelle. Il est conseillé de placer, dans ce cas, la section de mesure en amont de l'échelle. La réalisation des digues doit être soignée ; veiller particulièrement à leur étanchéité. Il faut également attendre la stabilisation de l'écoulement avant de commencer la mesure.

La section de jaugeage doit être débarrassée de la végétation aquatique et de la végétation arbustive se trouvant sur les berges (recouverte pendant les crues) sur une dizaine de mètres en amont et en aval. Le travail sera réalisé périodiquement pendant la période d'étiage.

On doit éviter aussi les sîtes où se produisent des courants de retour et où existent des zones d'eau morte. Dans le cas où les berges risquent d'être inondées en hautes eaux, choisir la section présentant les zones de débordement les moins étendues possibles. Le débit passant dans les plaines d'inondation est souvent difficile à mesurer et il ne doit représenter que la proportion la plus faible possible du débit total.

Enfin, il faut tenir compte des accidents locaux des berges ou du fond : promontoires, échancrures, rochers, végétation, qui altèrent les conditions d'écoulement. Toutes les irrégularités ont un effet perturbateur, d'autant plus sensible que les dimensions de la section sont plus faibles: l'irrégularité des rives est plus sensible sur un lit étroit alors que l'irrégularité

du fond est plus marquée avec de faibles profondeurs. C'est pourquoi il est plus facile de jauger, avec une même précision relative, un grand fleuve qu'un petit cours d'eau, des hautes eaux qu'un étiage.

La section de mesure peut être située sans trop d'inconvénients, dans une zone à fond sableux et mobile, à condition que les variations de section soient négligeables pendant la durée de la mesure (nous rappelons que c'est l'échelle limnimétrique qui doit se trouver dans une section stable).

On peut aussi se placer dans une section où l'écoulement est plus uniforme et les vitesses moins grandes que dans la section rocheuse stable. Notons enfin que les conditions idéales ne sont jamais réalisées et que c'est à l'hydrométriste à faire un choix : entre plusieurs sections possibles, il doit choisir la moins mauvaise.

En résumé :

Les qualités essentielles d'une section de mesure sont les suivantes :

- *écoulement uniforme à filets parallèles,*
- *profil régulier dans un tronçon rectiligne,*
- *normale à la direction du courant.*

- Jaugeages à partir des ponts :

Les ingénieurs chargés de la construction d'un pont, ne pensent jamais à cette possibilité, et les ponts constituent rarement de bonnes sections de jaugeage. On ne devrait utiliser que les ponts :

. perpendiculaires à l'axe de la rivière (cette condition n'est pas impérative, on peut mesurer l'angle du pont avec l'axe de la rivière et faire la correction),

. ne présentant pas trop de piles intermédiaires qui perturbent l'écoulement. Dans le cas de pont à plusieurs piles, chaque passe est considérée comme une section particulière,

. placés dans un secteur rectiligne du lit afin que les zones de grande vitesse ne se trouvent pas près d'une culée,

. disposant d'une chaussée de largeur suffisante pour ne pas gêner la circulation et dont les garde-fous ne sont ni trop hauts, ni trop larges. Attention aux trottoirs en console qui ne sont pas toujours prévus pour supporter un véhicule dans le cas de jaugeages à l'aide d'un porte-à-faux.

Certains ponts, en particulier les ponts suspendus, sont équipés, sous leur tablier, de nacelles de visites, roulant sur des rails qui peuvent parfois être utilisées pour la mesure des débits.

Où doit-on jauger ? A l'amont ou à l'aval du pont ? Le plus souvent, l'écoulement est meilleur à l'amont et la surveillance des corps flottants plus aisée. Mais avec un saumon, on a quelques difficultés car il disparaît sous le pont, le câble frotte sur le parapet et l'équipement de mesure risque d'être projeté sur les piles. On peut, pour éviter ces inconvénients, prévoir un câble de retenue amont, mais il apporte parfois quelques difficultés.

En plongeant le saumon à l'aval du pont, il n'y a pas trop de problèmes dus à l'angle de dérive, mais il existe des zones de remous ou mêmes d'eaux mortes au droit des piles ou à proximité des culées.

L'hydrométriste chargé de la mesure, devra, dans chaque cas, peser les avantages et les inconvénients des deux méthodes et faire un choix en conséquence.

Pour les mesures à la perche, la position à l'amont de la passerelle est souvent préférable.

- Dans le cas d'une station devant être équipée d'une traille téléphérique, les critères de choix sont toujours les mêmes.

Il faut cependant insister sur le fait que la section doit être bonne pour les moyennes eaux et très bonne pour les hautes eaux. A l'étiage, il est toujours possible de trouver ailleurs une section convenant pour la mesure de ces débits. De plus, la cabine de manoeuvre des treuils sera toujours placée au-dessus des plus hautes eaux. Les zones avec lit très encaissé peuvent présenter un certain intérêt car on peut réaliser des ancrages directs (sans pylônes) pour le câble porteur.

En conclusion, nous dirons que le choix d'une section de jaugeage avec traille téléphérique doit être fait avec beaucoup de soin et après avoir observé minutieusement la rivière pendant une crue, car une fois l'installation réalisée, il est difficile de la déplacer. Dans le cas d'une station non permanente, (jaugeage à gué ou en bateau), il est plus facile de changer de section après quelques jaugeages en fonction des résultats obtenus ; les déplacements éventuels doivent être notés sur les carnets de jaugeage.

III. 2. 3. CHOIX DU MODE OPÉRATOIRE

Ce choix dépend :

- *de l'équipement de la station,*
- *de la dimension de la rivière,*
- *de la vitesse du courant,*
- *de la profondeur,*
- *dans tous les cas, de la vitesse de variation du plan d'eau.*

Les différents modes opératoires et le matériel utilisé pour les mettre en oeuvre, sont indiqués dans le tableau I ci-après. Nous avons distingués deux cas : rivière avec variation lente du plan d'eau où l'on appliquera la méthode classique de jaugeage et rivière soumise à des crues violentes et rapides : jaugeage continu ou par méthode des verticales indépendantes.

Les limites portées dans ce tableau sont données à titre indicatif; en effet, elles peuvent varier en fonction de l'expérience des opérateurs.

III. 2. 4. CHOIX DU MATÉRIEL

III.2 4 1. Généralités

Les différents types d'appareillage pour la mesure des vitesses dans un écoulement, décrits précédemment, ont des possibilités d'emploi très différentes. Il n'est pas possible de fixer une règle d'emploi générale permettant de choisir à coup sûr entre tel ou tel équipement.

TABLEAU I

CHOIX DU MODE OPERATOIRE ET DU SUPPORT DU MOULINET

Equipement de la station	Conditions hydrauliques			Montage du moulinet	Mode opératoire	
	Profondeur	Vitesse	Largeur		Variation lente du plan d'eau	Variation rapide du plan d'eau
1/ Aucun	<1 m	<1 m/s	-	Perche ordinaire ou avec coulisse	Méthode classique - A gué - point par point	Voir point 4, les conditions hydrauliques sont modifiées en cas de crue rapide
	0,30 <P < 1m	0,5<v<1m/s	-	Perche AGAR III	Méthode classique - A gué - par intégration	
2/ Passerelle sans parapet	<1 m	<1 m/s	-	Perche avec pied support	Méthode classique - Point par point	Voir point 3
	0,30 <P <1m	0,5<v<1m/s	-	Perche montée sur chariot-treuil	Méthode classique - Par intégration	Méthode des V.I. par intégration de préférence ou point par point
	<2 m	<2 m/s	-	Perche montée sur chariot-treuil	Méthode par point ou par intégration	
3/ Pont avec parapet	10m et plus	<2,5m/s	-	Cyclopotence manuelle légère ou porte à faux sur véhicule-saumon 25 kg	Méthode classique - Point par point ou par intégration	Méthode des V.I. par intégration de préférence ou point par point
	<10 m	>2,5m/s	-	Cyclopotence électrifiée ou manuelle lourde - Saumon 50 ou 100 kg suivant vitesse du courant	Méthode classique - Point par point ou par intégration	Méthode des V.I. par intégration de préférence ou point par point
4/ Aucun - Section définie par câble de 3 mm	>1 m	<3 m/s	<300 m	Bateau(type Zodiac Mark II) et équipement léger saumon 25 kg	Méthode classique - Point par point ou par intégration	Méthode des V.I. par intégration de préférence ou point par point
5/ Aucun - Section balisée	>1 m	<3 m/s	>300 m	Cercle hydrographique : - Bateau (type Zodiac Mark II) et équipement léger saumon 25 kg - Bateau de grande dimension avec équipement lourd saumon 50 ou 100 kg	Méthode classique - Point par point ou par intégration	Méthodes des V.I. difficilement applicable. Ancrage impossible exactement au même point. Longueur des manoeuvres d'ancrage. Seule solution : diminuer le nombre de verticales.
	> 1 m	>3 m/s	toutes largeurs	Sans	Jaugeage aux flotteurs	
6/ Téléphérique	10m et plus	5 à 6m/s	< 300 m	Saumon 100 kg	Méthode classique - Point par point ou par intégration (suivant type de matériel)	Méthode des V.I. point par point ou par intégration (suivant type de matériel)

V.I. : Verticales indépendantes

Il est bien évident que le choix du matériel est fonction des conditions hydrauliques dans l'écoulement à mesurer, mais aussi et surtout des moyens financiers dont on dispose qui ne permettent pas toujours d'acquérir le matériel le mieux adapté à chaque cas particulier. Ceci signifie, en clair, qu'il faudra très souvent se contenter du matériel disponible et essayer de faire au mieux.

Rappelons maintenant quelques règles qui doivent être toujours présentes à l'esprit de l'hydrométriste :

- pour les mesures de débits en eaux claires avec des tirants d'eau faibles, on utilisera de préférence le micromoulinet monté sur perche,

- il est toujours préférable, quand c'est possible, de jauger à l'aide d'une perche qui permet des repérages plus précis des positions du moulinet (jaugeages à gué ou avec supports à partir de passerelles),

- il est déconseillé de monter une perche sur un bateau,

- s'il n'existe pas de pont, on utilisera jusqu'à la limite de ses possibilités, le moulinet fixé à un lest et manoeuvré à partir d'un bateau. Cette méthode permet d'avoir des tirant d'air très petits, donc des erreurs sur la profondeur très faibles. Elle permet également d'utiliser la meilleure section existante,

- quand le bateau n'est pas utilisable, on jaugera à la cyclopotence à partir d'un pont s'il existe, ou à partir d'une station téléphérique en se souvenant que, dans ces conditions, les mesures sont parfois améliorées en utilisant un câble de retenue (avec cyclopotence jaugeage à l'amont du pont s'il existe un câble de retenue),

- un moulinet est étalonné pour un équipement donné et on peut faire une erreur de 2 à 3 % en utilisant un autre montage,

- le diamètre du câble électroporteur doit être le plus petit possible. Un saumon de 100 kg, fixé à un câble de 6 mm, a une traînée plus importante qu'un saumon de 25 kg suspendu à un câble de 3 mm pour une même vitesse de courant,

- En crue, sur rivières présentant un transport solide important, il vaut mieux perdre une partie de l'information en plaçant le moulinet assez haut au-dessus du saumon plutôt que de voir le moulinet ensablé ou même détérioré par les graviers en suspension,

- Ne pas oublier enfin que la qualité d'un jaugeage dépend le plus souvent du soin avec lequel le matériel est entretenu. Les appareils doivent être constamment en parfait état de marche ; pour cela, il convient de faire les réparations qui s'imposent dès qu'un incident apparaît, et ce au plus tard, au retour d'une tournée de mesure.

En résumé, le matériel à mettre en oeuvre est défini à partir des conditions locales de mesure ; mais à conditions hydrauliques identiques, l'équipement dépendra aussi du but immédiatement recherché par les études hydrologiques : une rivière ayant, par exemple, un grand potentiel hydroélectrique et sur laquelle sont envisagés des aménagements importants, sera mieux équipée du point de vue connaissance des débits que telle autre rivière dont l'intérêt économique est, à brève échéance, moins évident.

III.2 4 2. Choix de l'hélice du moulinet

L'hydrométriste se trouve placé devant ce choix lorsqu'il ne dispose, pour détecter les impulsions, que de compteurs à chiffres sauteurs n'acceptant que 10 ou 20 impulsions par seconde. Avec les compteurs électroniques, la capacité de comptage est plus grande et il est plus facile de choisir le pas de l'hélice convenant pour une plus large plage de vitesses.

Le choix de l'hélice du moulinet sera fait de telle manière que pour la vitesse maximale de l'écoulement, le nombre de tours par seconde de l'hélice reste toujours inférieur à la capacité de fonctionnement correcte du compteur.

Nous avons vu qu'une hélice est caractérisée par son pas théorique ou nominal qui est le pas choisi par le fabricant et son pas réel défini après étalonnage et qui diffère très peu du pas nominal. Le pas nominal p est égal à des valeurs simples : 0,10, 0,125, 0,25, 0,50, 1 m par exemple, tandis que le pas réel est représenté par des chiffres plus compliqués donnés par les formules de tarage.

Si n est le nombre de tours par seconde effectué par l'hélice placée dans un courant, la vitesse V du fluide sera donnée en première approximation par la relation :

$$V = p.n$$

Sur le terrain, on utilisera cette relation pour choisir l'hélice en fonction de la vitesse à mesurer et de la capacité du compteur d'impulsions dont on dispose.

Ainsi, avec un compteur F6 acceptant 10 i/s, on pourra mesurer les vitesses maximales suivantes :

0,10 x 10 = 1 m/s	avec l'hélice au pas 0,10 m
0,25 x 10 = 2,5 m/s	avec l'éhlice au pas 0,25 m
0,50 x 10 = 5 m/s	avec l'hélice au pas 0,50 m
1,00 x 10 = 10m/s	avec l'hélice au pas 1 m

Avec un compteur Z100 de OTT ou à présélection de Neyrpic, acceptant 20 i/s, les vitesses maximales possibles avec les différentes hélices seront multipliées par 2.

Ce calcul simple donne la limite supérieure d'utilisation. En ce qui concerne la limite inférieure, il n'est pas conseillé de travailler avec des valeurs de n trop faibles : on prendra donc n = 1 t/s et cette valeur donnera la valeur la plus faible de la vitesse pouvant être mesurée par chaque hélice avec une précision acceptable.

Avec les moulinets à génératrice de courant, il se produit une saturation de la dynamo pour les vitesses de rotation trop élevées : le choix de l'hélice sera fait à partir des courbes de tarage en estimant la vitesse maximale du courant dans la section.

Théoriquement, une même hélice peut mesurer toutes les vitesses, ce qui donne, pour les vitesses élevées, des signaux sortant de la gamme de mesure des appareils de détection. Les hélices de pas différents permettent de rester dans la gamme correcte afin de réaliser les mesures avec le maximum de précision. A noter qu'avec le moulinet à génératrice de courant, ce n'est pas l'appareil détecteur qui est en cause, mais le générateur du signal (dynamo) qui se sature au-delà d'une certaine valeur de la vitesse de rotation.

III.2 4 3. Choix du saumon

Ce choix dépend d'une part de la vitesse du courant à mesurer et d'autre part de l'équipement dont on dispose.

En règle générale, on doit toujours choisir le saumon le plus lourd, eu égard aux caractéristiques du support, avec un câble électroporteur dont le diamètre est le plus petit possible de façon à réduire au maximum l'angle de dérive.

Les charges maximales admissibles par les différents équipements (treuils, cyclopotences, trailles téléphériques...) sont

indiquées par les constructeurs sur les notices d'emploi. Il est conseillé de ne pas dépasser ces charges. Pour les jaugeages, à partir d'une embarcation légère, la masse du saumon ne devrait jamais dépasser 25 kg.

Les saumons légers (5 à 10 kg) seront utilisés avec des vitesses faibles (jusqu'à 1 m/s environ), particulièrement au cours des tournées de contrôle du réseau en période d'étiage.

On veillera à maintenir le contact de fond en parfait état de fonctionnement : c'est en effet le seul mécanisme un peu délicat de ce matériel.

III. 2. 5. LE CARNET DE JAUGEAGE

Les résultats de la mesure sont consignés sur un carnet. Différents modèles sont utilisés par les hydrométristes de tous les pays. Ils sont tous plus ou moins pratiques. Il est difficile de préconiser un modèle unique. La qualité principale que doit avoir tout carnet de jaugeage est la clarté.

Différentes formules sont possibles pour atteindre ce but. Sans prétendre donner le meilleur modèle, nous en retiendrons un qui nous paraît bien adapté aux jaugeages dont le dépouillement est effectué manuellement. A ce propos, nous considérons que cette façon de procéder devrait être maintenue et même généralisée.

Une équipe de jaugeurs parfaitement entraînée et travaillant avec ordre et méthode, peut, sans réaliser des tours de force extraordinaires, dépouiller les jaugeages qu'elle effectue durant l'année. Il faut, pour cela, traiter les documents au jour le jour et éviter les retards au dépouillement.

Nous estimons que le calcul automatique ne devrait intervenir que dans la phase interprétation des données,c'est à dire après établissement de la courbe de tarage.

En effet, si les services centraux hydrologiques situés généralement dans un grand centre ont facilement accès à un ordinateur, il n'en est pas de même des secteurs hydrologiques perdus sur le terrain : la transmission des données brutes conduirait à une perte de temps,et parfois de renseignements,beaucoup plus grande que le traitement manuel lui-même.

L'utilisation d'un ordinateur pour le dépouillement d'un jaugeage, entraîne un gaspillage de moyens dont on peut très facilement se passer. D'autant plus que les calculatrices électroniques qui se trouvent de plus en plus sur le marché, simplifient dans une très grande mesure, le dépouillement manuel ; nous en reparlerons dans le chapitre "Travaux de bureau".

Signalons cependant pour les personnes désirant dépouiller les jaugeages à l'aide d'un ordinateur que, dans ce cas, les carnets de jaugeage doivent être prévus pour cela et présentés obligatoirement sous forme de bordereau de perforation pour simplifier le travail de mise en carte des données. Les différents formats dépendent évidemment de la programmation et des machines utilisées et il n'est pas possible de donner des modèles valables dans tous les cas.

Prenons donc le risque de paraître rétrograde et contentons-nous de donner quelques conseils et directives pour la tenue d'un carnet de jaugeage dont le dépouillement sera réalisé à la main par l'agent chargé du travail sur le terrain.

La figure 39 montre un exemple de page de carnet de jaugeage inspiré de celui qui est utilisé au service Hydrologique de l'ORSTOM ; ce type de carnet est destiné aux moulinets à signalisation électrique. Pour les moulinets à génératrice de courant, la présentation sera un peu plus simple ; en effet, les colonnes tops, tours, temps et N/T seront remplacées par une colonne unique : tension.

Fig- 39 1

RIVIERE : ..... STATION : .....

JAUGEAGE du : ..... Heure : - D : ..... - F : ..... Hauteur :-D : ....-F :....

Emplacement et nature de la section : ..... (croquis au verso)

Mode opératoire : .....

Matériel utilisé : Moulinet : ..... N° ..... Hélice n° ..... pas : .....

Support : ..... Constante du saumon : .....

Début de la mesure en : .....

Position du zéro : ..... 1 top = ...

Opérateur : .....

Observations : .....

.....

N°	Heure Hauteur	Distance	Profondeurs : - mesurée - corrigée	Positions du moulinet	Angle α	 β	Nombre de tops	 tours	Temps s	N/T	V m/s	Observations

Suite JAUGEAGE du : .....

N°	Heure Hauteur	Distance	Profondeurs : - mesurée - corrigée	Positions du moulinet	Angle α	 β	Nombre de tops	 tours	Temps s	N/T	V m/s	Observations

Ces feuilles sont montées sur une planchette avec une couverture en plastique transparent pour protéger un peu l'écriture par temps de pluie. On peut utiliser une feuille de papier carbone pour obtenir deux originaux que l'on sépare après la mesure et qui seront confiés à deux personnes différentes. Mais ceci n'est pas une nécessité absolue car, dans certaines circonstances difficiles, cela complique un peu la tenue du carnet. Après la mesure, les feuilles utilisées seront toujours séparées du bloc pour éviter de les perdre si un incident survient au cours des jaugeages ultérieurs.

Le carnet de jaugeage sera tenu avec le plus grand soin. Malgré cela, il peut arriver que les feuilles soient un peu salies au cours des manipulations ; il n'est pas recommandé de recopier les résultats des mesures. Les feuilles sont à conserver et à archiver quel que soit leur état, même si elles sont très sales ou partiellement illisibles. Le dépouillement devra toujours être fait directement à partir de l'original.

La feuille de jaugeage doit grouper le maximum de renseignements (matériel utilisé, mode opératoire, origine de la mesure, état des berges, irrégularités du courant, etc...) notées sur les lignes prévues pour cela ou dans la colonne observations afin de permettre une mise au net aisée des résultats. Le carnet de jaugeage est avant tout un document de travail et il vaut mieux qu'il soit un peu chargé en notation, même superflues, parfois gribouillées, plutôt que net mais incomplet.

La ligne "emplacement de la section" sera complétée par une description sommaire des lieux ou un croquis au dos de la feuille. On précisera la nature de la section : sable, gravier, seuil artificiel, etc...

Pour le mode opératoire, on indiquera :

- dans le cas d'une variation lente du plan d'eau :
  - . classique à gué point par point,
  - . ou classique par intégration amont pont,
  - . ou classique point par point bateau,

etc...

- dans le cas d'une variation rapide du plan d'eau :

. V.I. par intégration aval pont,

. ou V.I. point par point téléphérique, etc...

On notera avec précision le "matériel utilisé" : marque du moulinet, numéro, numéro et pas de l'hélice. La ligne "support" sera complétée par les indications concernant la fixation du moulinet : perche ordinaire, perche + coulisse, perche sur chariot treuil, cyclopotence + saumon de... kg , bateau + saumon de... kg ou téléphérique + saumon de... kg, etc...

La ligne et la colonne"observations" sont destinées à recevoir tous les détails et renseignements utiles pour faciliter le dépouillement : irrégularités du lit, de la vitesse, zones d'eau morte, incidents, changements d'hélice, etc...

On notera l'origine de le mesure en rive droite ou rive gauche sur la ligne : "Début de la mesure en : ....." ; on ajoutera quelques commentaires sur les conditions d'écoulement près des berges : herbes, contre-courants ou zone d'eau morte, etc... Sur la ligne "Position du zéro" on indiquera si le zéro est calé à la surface (treuil avec compteur positif en descendant) ou au fond (perche).

L'angle α est l'angle de dérive dans le plan vertical, l'angle β est l'angle entre l'axe du saumon et la perpendiculaire à la section de jaugeage dans le plan horizontal.

Dans la colonne "Heure-hauteur", on notera en cas de variation de la cote du plan d'eau, l'heure et la hauteur à l'échelle.

La colonne profondeur est utilisée pour noter la lecture faite sur le compteur ou la perche (profondeur mesurée) puis pour noter la valeur réelle de la profondeur après correction : angle α, et constante du saumon (profondeur corrigée).

Signalons que des essais ont été faits pour recueillir les résultats des mesures sur magnétophone portatif. Il est alors nécessaire de procéder au bureau, à un travail de transcription, qui doit être contrôlé en écoutant une deuxième fois la séquence enregistrée (dictée de contrôle) ; cette opération est parfois répétée si la dictée est trop rapide ou de mauvaise qualité phonique. Dans ce cas, il faut spécifier sur le carnet de jaugeage qu'il ne s'agit pas d'un véritable original, mais d'une transcription d'après enregistrement. En fait, cette méthode présente plus d'inconvénients (discipline rigoureuse à l'enregistrement qui crée des contraintes assez pénibles sur le terrain, pannes toujours possibles de l'appareil, risques d'oubli de renseignements, temps assez long pour la mise au clair, etc...) que d'avantages, et elle n'a pas eu le succès que l'on escomptait.

Le carnet de jaugeage constitue le document de base de toute mesure de débit. Le soin que l'on apporte à sa tenue et à la notation des renseignements entre souvent pour une très grande part dans la précision du résultat final. Ces documents sont gardés en archives avec les feuilles de dépouillement, ils doivent pouvoir être lus et compris par toute personne désirant effectuer un contrôle ou une comparaison et ce, même plusieurs années après la date de la mesure.

III. 2. 6. MESURE DES DISTANCES HORIZONTALES

La largeur du plan d'eau doit être mesurée avec précision. Cette mesure s'effectue :

- par lecture directe sur un double décamètre dans le cas d'un jaugeage à gué ou à partir d'un pont ou d'une passerelle,

- à l'aide d'un compteur à chiffres sauteurs roulant sur un câble en acier de 2 mm pour jaugeage à gué,

- à l'aide d'un compteur de distances du treuil double des stations téléphériques,

- avec un câble portant des repères ou mieux avec un compteur roulant sur le câble matérialisant la section dans le cas d'un jaugeage au bateau,

- en mesurant avec un décamètre la distance des deux bords du plan d'eau par rapport aux repères matérialiant la section dans le cas d'un jaugeage au cercle hydrographique.

La précision de la mesure de la largeur est généralement bonne. Les erreurs les plus courantes sont introduites par la flèche du câble porteur, la courbure du câble ou du décamètre entraîné par le courant, l'obliquité de la section de mesure par rapport à l'axe du cours d'eau. Les premières causes d'erreur sont souvent négligeables : en effet, pour une flèche peu importante, inférieure à 1 m, la différence entre la longueur de l'arc et de la corde est très faible. Il faut veiller à mettre le câble ou le ruban sous tension correcte. La dernière cause d'erreur se corrige facilement en estimant l'angle de la section par rapport à la direction du courant.

III. 2. 7. MESURE DE LA PROFONDEUR

III.2 7 1. Généralités

La profondeur de la rivière est mesurée à chaque verticale suivant des méthodes qui dépendent du matériel utilisé.

III.2 7 1 1. Montage sur perche

Dans le cas de jaugeage à gué avec une perche ordinaire graduée, la profondeur se lit directement sur la perche ; il faut placer les graduations dans une zone peu influencée par le ressaut, et en particulier éviter de lire sur la face amont de la perche. Pour des jaugeages sur petites rivières à l'étiage avec des profondeurs faibles, le tirant d'eau est mesuré parfois avec un mètre pliant en duralumin placé le long de la perche, parallèlement à la direction du courant, en prenant bien soin de faire reposer le mètre sur la semelle de la perche.

Si on utilise une coulisse, la profondeur sera lue directement, soit sur le vernier si cet équipement existe, ou en face d'un repère lorsque l'axe de l'hélice est placé exactement à la surface du plan d'eau. Dans ce cas, le moulinet ou la coulisse (suivant le constructeur) sont équipés à leur partie inférieure d'une butée qui empêche l'hélice de venir en contact avec le fond.

Lorsque les jaugeages sont réalisés à l'aide d'un pied de perche ou d'un chariot treuil à partir d'une passerelle, on procède de la façon suivante :

Le moulinet est fixé au bas de la perche (la distance entre l'axe de l'hélice et le zéro de la perche ou constante de fond est notée sur le carnet : on peut prendre C = 10 cm). L'axe de l'hélice étant placé à la surface du plan d'eau, on fait une première lecture en face de l'index dans le cas du pied de perche ou on remet le compteur à zéro avec le chariot treuil. La perche est ensuite descendue au fond : on fait une deuxième lecture. La profondeur est obtenue :

- dans le cas du pied de perche en soustrayant la lecture surface à la lecture fond et en ajoutant au résultat la constante de fond C,

- dans le cas du chariot treuil : en ajoutant à la lecture faite au compteur lorsque la perche touche le lit la valeur de la constante de fond C.

Dans tous les cas, il faut équiper la perche d'une semelle adaptée à la nature du fond :sans pointe pour un fond rocheux ou de béton, avec pointe et semelle assez large pour fonds sableux, avec large semelle pour les fonds de vase.

III.2 7 1 2. Montage sur saumon

Avec ce montage, la profondeur est mesurée à l'aide du compteur de profondeur du treuil utilisé pour la manoeuvre du saumon (treuil simple ou treuil double). On distinguera deux cas :

- le treuil est équipé d'un compteur avec zéro à la surface (mesure en descendant) ou zéro au fond (mesure en montant).

Le jaugeage point par point nous semble plus facile à réaliser avec un compteur du premier type. Les compteurs du deuxième type présenteraient quelques avantages pour les jaugeages par intégration réalisés du fond vers la surface avec un treuil électrique. Avec les compteurs du premier type et un contact de fond en bon état, nous n'avons jamais eu de problème pour réaliser des jaugeages par intégration en descendant.

On admet pour plus de commodité que le repère lié au compteur est l'axe de l'hélice du moulinet ; en effet, dans le jaugeage point par point, c'est la position du centre de l'hélice qui doit être définie de façon simple et rapide.

Dans le cas d'un compteur avec zéro à la surface, on opère de la façon suivante : l'hélice est placée de telle façon que son axe coïncide avec la surface de l'eau, le compteur est alors remis à zéro ; on laisse descendre le saumon jusqu'à toucher le fond.

La lecture au compteur augmentée de la constante du saumon donne la profondeur totale de la verticale. En remontant, on peut lire directement sur le compteur les cotes des différentes positions du moulinet.

Avec un compteur mesurant du bas vers le haut (zéro au fond) on met le compteur à zéro lorsque contact de fond repose sur le lit. L'hélice est alors à la position 0. En remontant l'équipement de mesure on peut lire directement sur le compteur les positions successives de l'hélice. La profondeur totale sera obtenue en ajoutant la valeur de la constante du saumon à la lecture du compteur au moment où l'axe de l'hélice se trouve exactement à la surface de l'eau.

Rappelons que la méthode employée pour mesurer la constante du saumon a été donnée dans le chapitre matériel au paragraphe II.2 2.

Avec le montage sur saumon, le compteur doit toujours indiquer la position de l'axe de l'hélice : pour cela, on met le compteur à zéro lorsque l'axe coïncide avec la surface de l'eau avec les compteurs à graduations positives en descendant ou lorsque le contact de fond ouvert repose sur le lit avec les compteurs à graduations positives en montant.

III.2 7 2. Corrections sur la profondeur

La mesure de la profondeur est exacte avec le montage du moulinet sur perche. Dans les écoulements à vitesse lente, le montage sur saumon équipé d'un contact de fond donne la profondeur de la rivière avec une très bonne précision.

Des erreurs sur la mesure de la profondeur, sont introduites lors de jaugeages effectués par fortes vitesses du fait de la dérive

de l'équipement de mesure sous l'action de la poussée du courant. Cette dérive est d'autant plus importante que le point de suspension est situé plus haut au-dessus du plan d'eau. On peut diminuer cette dérive en augmentant la masse du saumon et en diminuant le diamètre du câble électroporteur. A cause de cette dérive, l'indication du compteur de profondeur est toujours plus grande que la profondeur réelle de la rivière.

Diverses méthodes ont été proposées pour corriger les indications du compteur et approcher au mieux la profondeur vraie. Nous en citerons deux dans la suite de ce paragraphe. Mais disons tout de suite que leur application n'est pas toujours très facile. On a souvent intérêt, particulièrement dans le cas de sections parfaitement stables, de faire avant et après la crue, un lever précis de la section donnant la profondeur aux différentes verticales en fonction de la cote à l'échelle. On aura ainsi la section mouillée si elle est stable et cela aidera à la reconstituer si elle ne l'est plus.

Les indications du compteur relevées pendant le jaugeage seront corrigées en fonction des renseignements fournis par le lever topographique. Cette méthode est plus efficace, plus précise et d'une mise en oeuvre plus rapide que celles basées sur l'estimation de l'angle vertical α dû à la dérive.

Dans le cas de sections instables équipées de trailles téléphériques, il est possible, en cas de crue importante avec très fortes vitesses, de réaliser le lever du profil en travers de la section de mesure en opérant avec le saumon de 100 kg dépouillé de tous ses accessoires (moulinet, queue et gouvernail). Cette méthode a été utilisée en 1969 sur l'Oued Zeroud en Tunisie. On laisse descendre le saumon dans l'eau avec le maximum de vitesse verticale comme un plomb de sondage en tournant rapidement à la main la manivelle de treuil, jusqu'à ce qu'il vienne en contact avec le fond. Le câble reste ainsi pratiquement vertical. On répète l'opération quatre ou cinq fois à chaque verticale ; la profondeur est donnée par la moyenne de cinq mesures.

En général, comme cela a été indiqué dans le paragraphe II.4 2 2., les cyclopotences et certains porte-à-faux pour jaugeage au saumon sont équipés de rapporteurs gradués en degrés afin d'estimer l'angle α de dérive dans le plan vertical. Avec les stations téléphériques, la détermination de cet angle est un peu moins facile mais on y arrive assez bien avec un rapporteur à pendule. Lorsque les conditions le permettent, on notera cet angle et on corrigera les profondeurs par l'une des deux méthodes ci-après :

- Méthode du Geological Survey citée par M. ROCHE (1)

Soit un équipement de jaugeage (saumon et moulinet) suspendu en un point P situé à la distance d au-dessus de la surface de l'eau (figure 40). Lorsque le saumon est immergé, le câble de suspension prend, sous l'action du courant, une position d'équilibre représentée par la courbe PLMN faisant un angle α avec la verticale PAB.

Le compteur du treuil étant mis à zéro lorsque le saumon se trouve en A juste au-dessus de l'eau, la longueur de câble déroulée pour atteindre le fond en N correspond à la longueur de la courbe LMN. Cette longueur est plus grande que la profondeur réelle AB. Nous distinguerons deux éléments de correction :

- correction sur le câble exondé : longueur LM,
- correction sur le câble immergé : différence entre l'arc MN et la verticale AB.

Si α est l'angle fait par le câble avec la verticale, on peut écrire :

$$\cos \alpha = \frac{PA}{PM} = \frac{PA}{PL + LM} = \frac{PA}{PA + LM} \quad \text{puisque } PA = PL$$

---

(1) Hydrologie de surface.

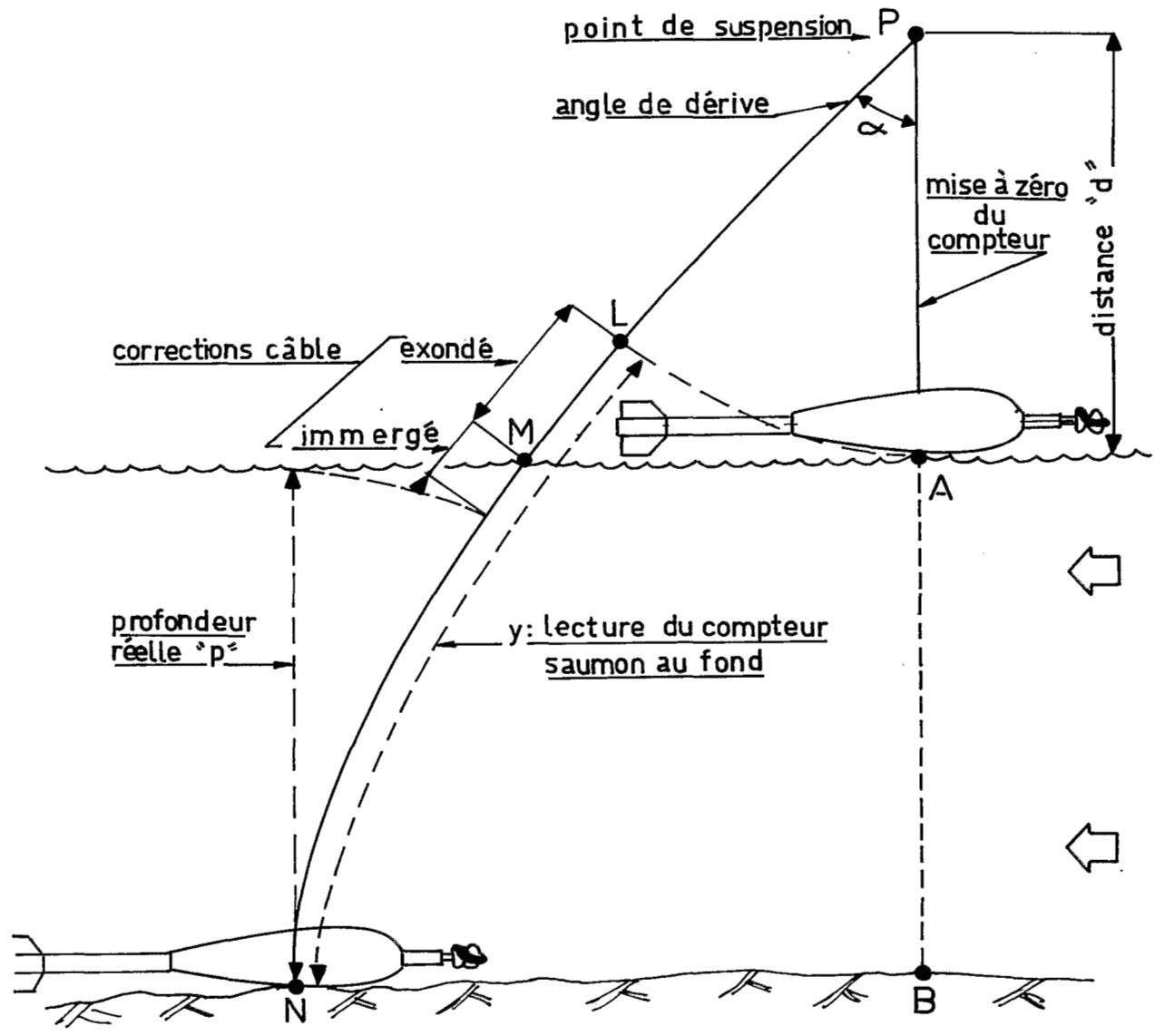

point de suspension P
angle de dérive
α
mise à zéro du compteur
distance "d"
L
corrections câble exondé
immergé
M
A
profondeur réelle "p"
y: lecture du compteur saumon au fond
N
B

Fig - 40

d'où

$$PA + LM = \frac{PA}{\cos \alpha}$$

et $LM = \frac{PA}{\cos \alpha} - PA = PA(\frac{1}{\cos \alpha} - 1) = PA\ (\sec \alpha - 1)$

Or Pa = d d'où :

$$LM = d\ (\sec \alpha - 1) \qquad (1)$$

C'est la première correction à apporter à la lecture y du compteur qui donne la longueur l'arc LN. La longueur du câble immergé est égale à :

$$MN = LN - LM = y - d\ (\sec \alpha - 1)$$

La profondeur réelle p de la rivière est donnée par la relation :

$$p = AB = MN\ (1 - K)$$

$$p = y - d(\sec - 1)\ (1 - K) \qquad (2)$$

K est un coefficient donné par le tableau ci-dessous en fonction de l'angle α :

en degrés	K	en degrés	K
6	0,0016	24	0,0296
8	0,0032	26	0,0350
10	0,0050	28	0,0408
12	0,0072	30	0,0472
14	0,0098	32	0,0544
16	0,0128	34	0,0620
18	0,0164	36	0,0698
20	0,0204	38	0,0786
22	0,0248	40	0,0880

En cas de courant violent, pour lequel les angles verticaux sont supérieurs à 14°, on opère de la façon suivante :

A partir d'un bateau ou d'un pont horizontal, on mesure la distance PA = d à l'aide du treuil à la première et à la dernière verticale. Si le jaugeage est effectué à partir d'une traille téléphérique ou d'un pont incliné, la distance d sera mesurée à chaque verticale, ce qui complique un peu la mesure.

Puis le saumon sera placé au contact de la surface de l'eau sans être immergé de façon à ce que le câble de suspension reste vertical. Le compteur du treuil est alors mis à zéro. On fait ensuite descendre le saumon jusqu'au fond : le compteur donne y = LN. On note, dans cette position, la valeur de l'angle α.

On calcule la correction sur le câble exondé LM puis la profondeur réelle p.

Les deux tableaux suivants permettent, connaissant d, y et α, de calculer la valeur de p : pour cela, entrer avec d et α dans le tableau II on obtient la valeur x de LM, entrer ensuite avec (y - x) et α dans le tableau III on obtient la valeur u qui donnera p à partir de la relation :

$$p = y - x - u$$

TABLEAU II

A - Correction câble exondé : distance LM = x en mètres en fonction de d et α .

Hauteur du point de suspension	α en °													
	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
0,50	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,15
1	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,30
1,50	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,18	0,20	0,23	0,27	0,31	0,35	0,40	0,46
2	0,06	0,08	0,10	0,13	0,16	0,19	0,24	0,27	0,31	0,36	0,41	0,47	0,54	0,61
3	0,09	0,12	0,15	0,19	0,24	0,28	0,34	0,40	0,46	0,54	0,62	0,71	0,81	0,92
4	0,12	0,16	0,21	0,26	0,31	0,38	0,45	0,53	0,62	0,72	0,82	0,94	1,08	1,22
5	0,15	0,20	0,26	0,32	0,39	0,47	0,56	0,66	0,77	0,90	1,03	1,18	1,35	1,53
6	0,18	0,24	0,31	0,39	0,47	0,57	0,68	0,80	0,93	1,08	1,24	1,42	1,61	1,83
7	0,21	0,28	0,36	0,45	0,55	0,66	0,79	0,93	1,08	1,25	1,44	1,65	1,88	2,14
8	0,24	0,32	0,41	0,51	0,63	0,76	0,90	1,06	1,24	1,43	1,65	1,89	2,15	2,44
9	0,28	0,36	0,46	0,58	0,71	0,85	1,01	1,19	1,39	1,61	1,86	2,12	2,42	2,75
10	0,31	0,40	0,51	0,64	0,79	0,95	1,13	1,33	1,55	1,79	2,06	2,36	2,69	3,05
11	0,34	0,44	0,57	0,71	0,86	1,04	1,24	1,46	1,70	1,97	2,27	2,60	2,96	3,36
12	0,37	0,48	0,62	0,77	0,94	1,14	1,35	1,59	1,86	2,15	2,47	2,83	3,23	3,66

TABLEAU III

B - Correction câble immergé : u en mètres en fonction de y - x et de α .

Longueur câble immergé y - x	α en °													
	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
1	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
2	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11	0,12	0,14	0,16	0,18
3	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,21	0,24	0,26
4	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35
5	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,18	0,20	0,24	0,27	0,31	0,35	0,39	0,44
6	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,28	0,33	0,37	0,42	0,47	0,53
7	0,07	0,09	0,11	0,14	0,17	0,21	0,25	0,29	0,33	0,38	0,43	0,49	0,55	0,62
8	0,08	0,10	0,13	0,16	0,20	0,24	0,28	0,33	0,38	0,44	0,50	0,56	0,63	0,70
9	0,09	0,12	0,15	0,18	0,22	0,27	0,32	0,37	0,42	0,49	0,56	0,63	0,71	0,79
10	0,10	0,13	0,16	0,20	0,25	0,30	0,35	0,41	0,47	0,54	0,62	0,70	0,79	0,88
11	0,11	0,14	0,18	0,22	0,27	0,33	0,39	0,45	0,52	0,60	0,68	0,77	0,86	0,97
12	0,12	0,15	0,20	0,24	0,30	0,36	0,42	0,49	0,57	0,65	0,74	0,84	0,94	1,06
13	0,13	0,17	0,21	0,27	0,32	0,38	0,46	0,53	0,61	0,71	0,81	0,91	1,02	1,14
14	0,14	0,18	0,23	0,29	0,35	0,41	0,49	0,57	0,66	0,76	0,87	0,98	1,10	1,23
15	0,15	0,19	0,25	0,31	0,37	0,44	0,53	0,61	0,71	0,82	0,93	1,05	1,18	1,32

Exemple

On a :

- hauteur du point de suspension au-dessus de l'eau : d = 5 m

- longueur du câble déroulé depuis la mise à zéro du compteur (saumon non immergé au ras de l'eau, câble vertical) jusqu'au contact du saumon avec le fond : y = 7,77 m,

- angle de dérive, saumon au fond $\alpha = 30°$

Calculer la profondeur réelle p :

a) le tableau II donne pour :
$d = 5$ m et $\alpha = 30° \longrightarrow x = 0,77$ m

b) Nous avons $y - x = 7,00$ m

Le tableau III donne pour :
$(y - x) = 7,00$ m et $\alpha = 30° \longrightarrow u = 0,33$ m

d'où $p = y - x - u = 7,77 - 0,77 - 0,33$

$$p = 6,67 \text{ m}$$

Les positions intermédiaires de l'équipement de mesure sur la verticale sont corrigées de la même façon à partir des longueurs de câble déroulées y_1, y_2,.... et des angles α_1, α_2..... observés en chaque point. En général, on peut utiliser la valeur de α existant lorsque le saumon est au fond ; la différence entre α et les angles α_1, α_2.... aux différentes positions du moulinet est inférieure aux erreurs d'estimation des angles.

- Méthode de H. ANDRE et al. citée dans "Hydrométrie pratique des cours d'eau"

Nous citons cette méthode pour mémoire car c'est une version un peu compliquée de la méthode précédente. En effet, H. ANDRE

introduit, pour la correction de profondeur, deux angles de dérive : α_1 lorsque le saumon est juste immergé et α_2 lorsque le saumon touche le fond (voir figure 41), ce qui, compte tenu des conditions dans lesquelles s'effectuent les mesures, ne simplifie pas les manoeuvres et risque de nuire à la précision (temps de mesure plus long) au lieu de l'améliorer. Pour plus de détails, nous renvoyons aux pages 156 et suivantes de l'ouvrage cité, en faisant remarquer toutefois qu'il nous semble inutile d'opérer une correction tant que l'angle α reste inférieur à 10° ; les irrégularités du fond sont en effet, dans ces cas-là, supérieures aux corrections données par les tableaux et rendent de ce fait, les corrections parfaitement illusoires.

Notons, de plus, que dans le cas de rivières en crue, avec de nombreux charriages en surface, il n'est pas très recommandé de mettre le compteur à zéro avec le saumon juste immergé à cause des risques courus par le moulinet et aussi parce que cette position est souvent instable, ce qui rend difficile l'estimation de l'angle α .

Nous préférons mettre le compteur à zéro,le saumon étant hors de l'eau, tangent à la surface, le repère lié au compteur étant, dans ce cas, la semelle du contact de fond par exemple...

En résumé :

- La profondeur est connue avec précision par lecture directe sur la graduation de la perche lorsque ce support peut être utilisé,

- Elle est connue avec une bonne précision lorsque le moulinet est monté sur saumon et qu'on opère dans un écoulement relativement lent (angle de dérive inférieur à 14°),

- En cas de crue violente, avec fortes vitesses, la profondeur mesurée par le compteur du treuil est toujours plus grande que la profondeur réelle par suite de l'angle de dérive : on peut corriger la lecture du compteur en utilisant la méthode donnée ci-dessus ou en comparant avec les données d'un relevé topographique précis de la section mouillée,

- Il ne faut pas s'obstiner à vouloir mesurer à tous prix des paramètres secondaires dans le but d'améliorer une précision que les difficultés de mesure et le temps perdu risquent de détériorer dans de notables proportions.

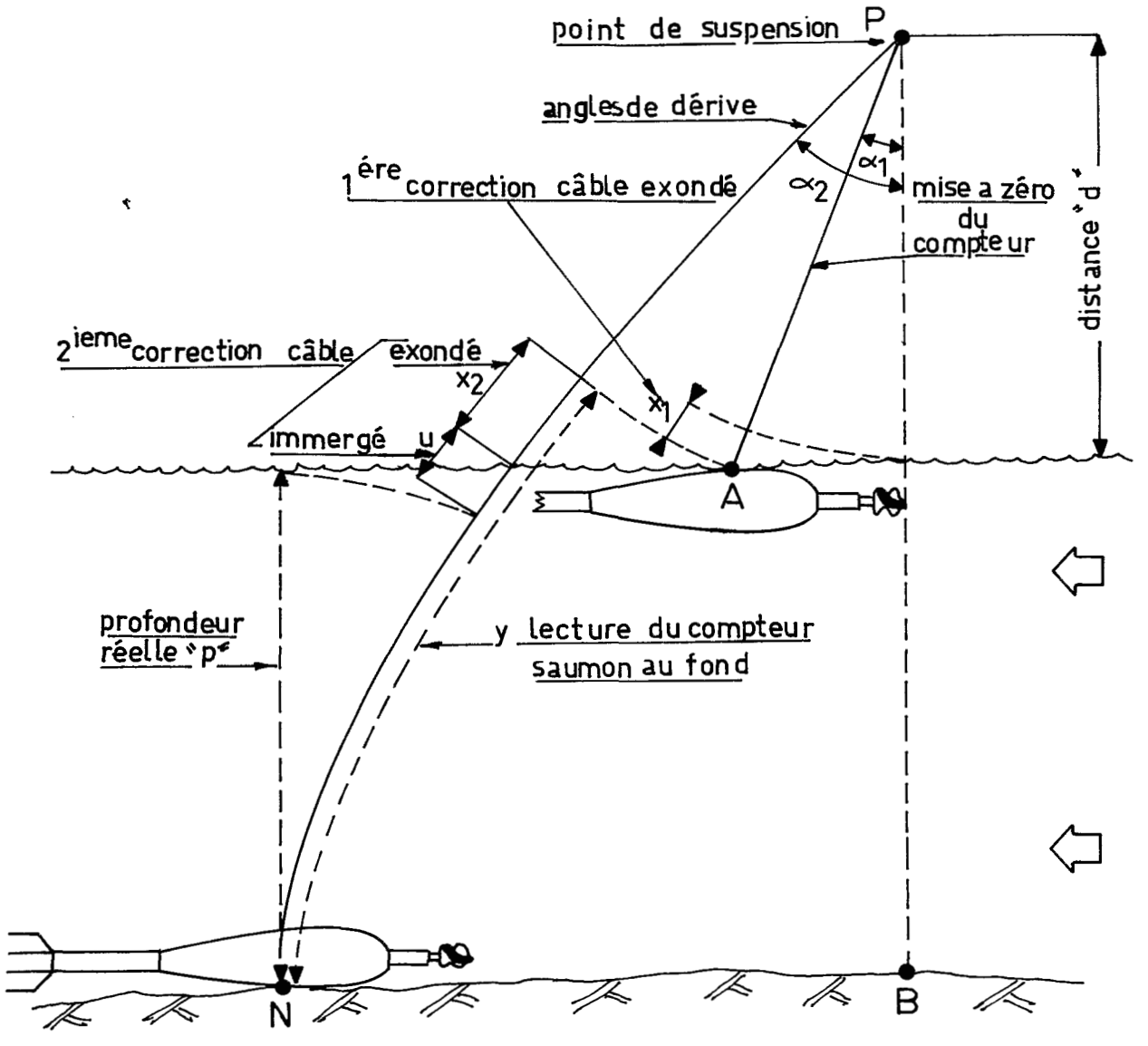

point de suspension P
angles de dérive
1ére correction câble exondé
mise a zéro du compteur
distance "d"
2ieme correction câble exondé
immergé u
x2
x1
α1
α2
A
profondeur réelle "p"
y lecture du compteur saumon au fond
N
B

Fig-41

III. 2. 8. NOMBRE DE VERTICALES

Le nombre de verticales dépend des caractéristiques géométriques du profil et des conditions d'écoulement. D'une manière générale, il convient de rapprocher les verticales aux endroits où la variation de vitesse dans le sens horizontal est plus rapide. Il faut également rapprocher les verticales au droit des discontinuités brusques et importantes de la cote du fond, afin de pouvoir tracer au mieux le profil de la section.

Dans le cas de sections stables, un lever topographique précis à l'étiage, permet de bien positionner les zones de discontinuité lorsqu'elles existent. La norme internationale ISO 748 préconise un nombre de verticales tel qu'en chaque point on contrôle sensiblement des tranches égales de débit. Certains auteurs ont préconisé une répartition des verticales telles que pas plus de 10 % ou mieux 5 % du débit ne passe entre deux verticales. En pratique, ces conditions ne sont pas faciles à réaliser.

En général, on choisit de 12 à 20 verticales suivant l'irrégularité du fond et les gradients des vitesses.

Avec l'expérience et la connaissance des sections de mesure, la répartition des verticales se fait assez aisément. Cependant, on peut donner, dans le cas d'une section régulière, et d'un écoulement uniforme, la règle suivante pour le choix des verticales :

Soit L la largeur totale de la rivière :

- Les verticales seront espacées d'environ L/15,
- On ajoutera une verticale près de chaque rive .

  Exemple : L = 60 m L/15 = 4 m

  Les abscisses des verticales seront égales à 2, 4, 8, 12..... 52, 56, 58 mètres, soit au total 16 verticales.

. Suivant la largeur de la rivière, on prendra pour L/15 la valeur arrondie la plus proche, ce qui revient à augmenter ou diminuer (suivant le sens de l'arrondi) le nombre de verticales.

Exemple : L = 50 m L/15 = 3,33, on prendra 3,00

Les abscisses seront donc : 1, 5, 3, 6, 9..... 42, 45, 47, 48,5 mètres, soit au total 18 verticales.

La fig. 42représente la position des verticales. Cette méthode a été donnée par G. HIEZ, mais en utilisant un intervalle de 0,1 L, ce qui revient à prendre 11 verticales dans la section. Ce nombre nous paraît un peu faible et nous estimons préférable de diviser la largeur de la section en 15 parties égales.

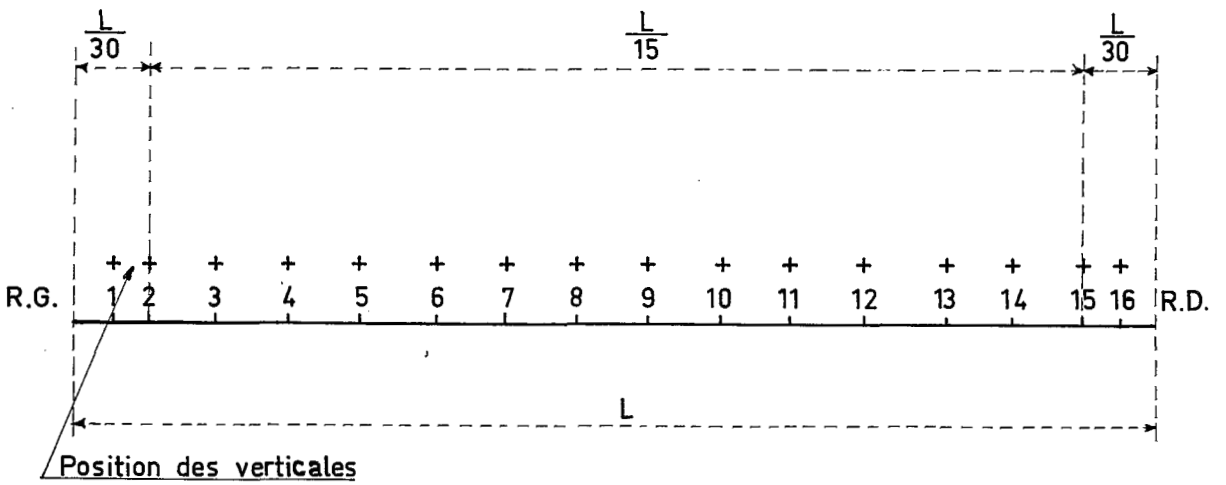


Fig_42

Il existe d'autres méthodes, celle-ci à l'avantage d'être simple et son unique but est de fixer les idées. On peut, évidemment, l'aménager en fonction des conditions locales d'écoulement.

- Si l'écoulement est bien uniforme, on pourra augmenter un peu l'écartement des verticales au milieu de la section (verticales donnant à peu près les mêmes valeurs de la vitesse),

- Dans le cas d'une section avec profil de fond très irrégulier on rapprochera les verticales au droit des irrégularités du lit, comme le montre la figure 43,

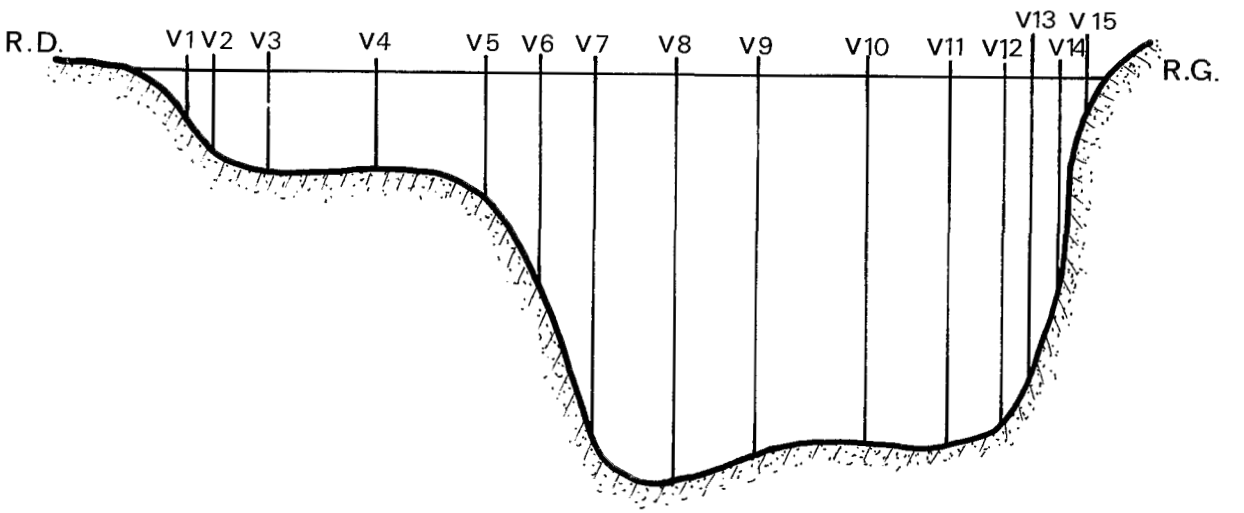


Fig_43

- Si, dans la section, la répartition des vitesses est irrégulière par suite de la présence d'obstacles en amont (île en particulier) il y a lieu de resserrer les verticales au droit des zones de discontinuité des vitesses. Ceci n'est valable que lorsqu'il n'est pas possible de trouver un emplacement plus favorable à la réalisation du jaugeage,

- Dans le cas où l'on est contraint de jauger à partir d'un pont à plusieurs arches, chaque travée doit être considérée comme une section indépendante. Dans une rivière comportant un lit mineur assez étroit et profond parcouru par un fort courant et un lit majeur très étendu mais dans lequel le débit total est faible (zones d'inondation), les verticales seront concentrées dans la zone de grand débit (lit mineur) et plus espacées dans le lit majeur.

•

N'oublions pas que, lors d'une mesure de débit, l'hydrométriste a toujours le choix entre deux imprécisions : soit faire un grand nombre de verticales pour mieux connaître la vitesse et la section, mais passer beaucoup de temps à la mesure et risquer de voir l'imprécision augmenter par suite de la variation du débit, soit choisir un peu moins de verticales pour laisser une précision suffisante à la mesure de la section et de la vitesse en diminuant le temps de mesure de façon à rester dans des limites de variation du débit relativement étroites pendant la durée du jaugeage.

Se rappeler également que le nombre de verticales n'est pas proportionnel à la longueur de la rivière, ce nombre est sensiblement le même que la rivière, soit très large ou relativement étroite. En effet, l'écoulement est plus régulier et plus uniforme dans une grande rivière de plaine que sur un torrent de montagne.

III. 3. RÈGLES PARTICULIÈRES LIÉES AU MODE OPÉRATOIRE

Nous donnerons d'abord quelques consignes particulières liées aux méthodes puis quelques conseils pour la préparation du matériel et l'exécution des mesures lors de la mise en application des différents modes opératoires.

III. 3. 1. CONSIGNES LIÉES AUX MÉTHODES

Ce qui a été dit ci-dessus, relativement aux mesures de la largeur, de la profondeur, du nombre de verticales, etc... est valable pour toutes les méthodes.

III.3 1 1. Jaugeage point par point

III.3 1 1 1. Nombre de points de mesure

Dans de nombreux pays, ce nombre de points est évalué à partir de formules empiriques tenant compte uniquement de l'aire de la section mouillée. Ces formules donnent des résultats souvent très différents et aboutissent parfois à des temps de mesure très longs.

- Cas des grandes rivières, jaugeage avec moulinet normal suspendu sur saumon :

Nous adoptons les règles suivantes :

- pour des profondeurs supérieures à 1 m, on prendra cinq points répartis de la façon suivante : un en surface à 0,10 m en dessous du plan d'eau, un au fond à la distance que permet le type de montage du moulinet (constante du saumon) et trois points répartis dans la hauteur restante au 2/10, 5/10 et 8/10 de cette hauteur.

La figure 44 montre la répartition des points sur la verticale.

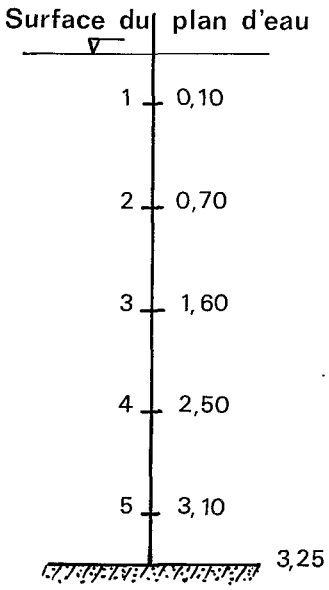


Fig.44

. profondeur totale : 3,25 m
. constante du saumon : 0,15 m
. premier point à 0,10 m de la surface,
. cinquième point à 0,15 m du fond ou 3,10 de la surface;

La hauteur intermédiaire est égale à 3,00 m. Nous prenons :

. deuxième point 0,10 + (2/10 x 3,00) = 0,70 m
.troisième point 0,10 + (5/10 x 3,00) = 1,60 m
.quatrième point 0,10 + (8/10 x 3,00) = 2,50 m

} à partir de la surface

Tous les jaugeages seront réalisés avec une répartition des points identiques.

- Pour des profondeurs comprises entre 1 m et 0,50 m : trois points, un en surface (0,10), un au fond (distance égale à la constante de fond) et un au milieu,

- En-dessous de 0,50 m de profondeur, prendre deux points, un en surface et le deuxième près du fond.

Avec un moulinet normal monté sur perche, il est possible de réaliser cinq points jusqu'à des profondeurs égales à 0,60 m : un point à 0,10 de la surface et à 0,10 du fond, les trois autres respectivement à 0,18, 0,30, et 0,38 de la surface.

- Cas des petites rivières ou des mesures à l'étiage avec un micro-moulinet :

Les micromoulinets sont équipés d'hélices de faible diamètre pouvant descendre jusqu'à 3 cm. Avec ce matériel monté uniquement sur perche, il est possible de réaliser cinq points par verticales jusqu'à des profondeurs voisines de 0,25 m :

. premier point à 0,05 m de la surface,
. deuxième point à 0,08 m de la surface,
. troisième point à 0,12 m de la surface,
. qùatrième point à 0,17 m de la surface,
. cinquième point à 0,20 m de la surface ou 0,05 du fond.

- Dans tous les cas il faut se rappeler que la distance entre deux points sur une même verticale ne doit pas être inférieure au diamètre de l'hélice et que le moulinet ne mesure pas une vitesse ponctuelle mais une vitesse moyenne dans une portion de section mouillée dont la surface est égale à la surface balayée par l'hélice dans sa rotation.

Pour répartir les points sur chaque verticale, on opère de la façon suivante :

- avec une perche équipéed'un coulisseau, placer l'axe du moulinet en surface et lire directement la profondeur de l'eau sur la perche (0 au fond). Faire ensuite descendre le moulinet aux différentes positions choisies.

- avec un moulinet monté sur treuil, mettre le compteur de profondeur à zéro, l'axe de l'hélice étant en surface, puis descendre au fond. Noter la profondeur, répartir les points. Mesurer les vitesses en remontant le moulinet aux différentes positions choisies.

Ne pas oublier que :

L'augmentation exagérée du nombre de points donne une précision toute illusoire si, pendant le même temps, la cote du plan d'eau varie notablement.

III.3 1 1 2. Le temps de mesure

Dans une section de rivière naturelle, les vitesses sont soumises à des pulsations provoquées par les remous, les tourbillons, les irrégularités du lit. La valeur de la vitesse en un point oscille entre des maximums et des minimums et ce avec une période qui présente le plus souvent une certaine régularité.

La mesure de la vitesse devra donc être faite pendant un temps suffisamment long pour que l'erreur due à ces pulsations soit négligeable. La durée minimale de mesure en un point ne doit jamais être inférieure à 30 secondes pour une section régulière avec écoulement uniforme. Cette durée doit être augmentée dans le cas de sections irrégulières avec écoulement très perturbé. Avec des vitesses faibles, il faut veiller à compter un nombre suffisant de tours.

En règle générale, nous considérons qu'il faut mesurer la vitesse au moins pendant trente secondes ou compter au moins cinquante tours dans le cas d'un écoulement uniforme ou si des conditions dangereuses imposent d'agir rapidement (vitesses approchante 3 m/s lorsque l'on est en bateau) ou enfin lorsque les variations du débit sont extrêmement rapides. Dans ce dernier cas, on peut d'ailleurs être amenés à descendre jusqu'à 10 ou 15 secondes, lorsque au contraire dans de bonnes conditions, on souhaite un jaugeage précis mieux adopter 60 secondes.

III.3 1 2. Jaugeage par intégration

Les jaugeages par intégration peuvent être réalisés soit à l'aide d'un montage sur perche (perche AGAR III), soit à l'aide d'un montage suspendu sur saumon.

Dans le premier cas, la verticale est prospectée sur toute sa hauteur et on obtient directement la vitesse moyenne sur la verticale.

Dans le second cas, le moulinet ne peut pas toucher le lit de la rivière par suite de la présence du détecteur de fond et des divers modes de fixation possibles du moulinet sur le saumon. Il existe donc une certaine distance entre l'axe de l'hélice et le bas du détecteur de fond, appelée généralement "Constante du saumon", le long de laquelle il ne sera pas possible de mesurer la vitesse. Cette constante de fond peut varier de 15 à 30 ou même 50 cm suivant le montage. Arrivé au fond, le détecteur de fond se ferme et le compteur ne peut plus enregistrer les tours d'hélice : les valeurs de N et T enregistrées pendant la descente donnent la vitesse moyenne entre la surface et la position atteinte par le moulinet au moment de la fermeture du contact de fond. Pour avoir une mesure complète, il faudrait pouvoir connaître le nombre de tours effectués par l'hélice, le moulinet se déplaçant de la position contact de fond fermé jusqu'au lit de la rivière. Pour estimer ce nombre de tours, il existe deux méthodes :

a) Si C représente la constante de fond et v la vitesse de descente du moulinet, pour atteindre le fond, le moulinet mettrait un temps t = C/v. On opère de la façon suivante : lorsque le détecteur se ferme au contact avec le lit, on arrête le comptage des tours et du temps puis on relève légèrement l'ensemble saumon-moulinet à l'aide du treuil et on reprend le comptage des tours d'hélice pendant un temps t = C/v, soit n ce nombre de tours. Si N et T sont le nombre de tours et le temps mesuré pendant la descente, la vitesse moyenne le long de la verticale sera donnée en remplaçant le nombre de tours par seconde dans la formule du moulinet par $N + n\left(T + t\right)$. Ceci revient à admettre que la vitesse sur la portion de verticale correspondant à la constante de fond est égale à celle qui existe au point où le contact de fond se ferme. On a ainsi tendance à surestimer un peu la vitesse au fond, mais l'erreur commise est très faible surtout si la distance C est petite. Il est possible d'apporter une correction à cette mesure en ne prenant que les 2/3 du temps t = C/v. Par exemple si la constante de fond est égale à 18 cm, la vitesse de descente v = 3 cm/s, le temps t étant égal à 6 secondes, la mesure complémentaire de n sera faite sur un temps égal à

$\frac{6 \times 2}{3}$ = 4 secondes.

b) Le débit Δq qui passe dans la portion de verticale correspondant à la constante de fond C est approximativement égal à :

$$\Delta q(m2/s) = 2/3 \; C(m) \times Vf \; (m/s)$$

Vf étant la vitesse du courant au point de fermeture du contact de fond.

Pour déterminer Δq m2/s, il faut donc mesurer Vf. Pour cela, remonter légèrement le saumon pour ouvrir le contact et compter le nombre de tours d'hélice pendant 30 secondes. Cette méthode est probablement un peu plus précise que la première, mais elle présente l'inconvénient de laisser le moulinet un peu plus longtemps au fond, ce qui peut faire courir quelques risques au moulinet dans le cas de rivières en crue avec transport solide important.

Ne pas oublier que si l'on opère sur une rivière en forte crue avec transports en surface et charriages de fond importants, il sera plus prudent de négliger la mesure au fond : la précision qu'on obtient en faisant cette mesure ne vaut pas le risque de perdre ou de détériorer le matériel en l'exposant trop longtemps au fond. Dans ces conditions, les causes d'erreurs sont très nombreuses (dérive du câble, mauvaise définition du zéro en surface, risque d'ensablement du moulinet, etc...) et les quelques tops supplémentaires mesurés pendant quelques secondes n'améliorent pas beaucoup le résultat final.

Le jaugeage par intégration ne peut donner de bons résultats que si le temps de mesure est suffisamment long:60 à 100 secondes. Ceci implique de ne jamais utiliser cette méthode pour des profondeurs inférieures à 0,30 m avec la perche AGAR III (vitesse de montée 0,5 cm/s), et à 0,80 à 1 m avec le montage sur saumon (vitesse de descente égale à 1,5 à 2 cm/s).

Cette méthode ne peut être employée lorsque la vitesse du courant à mesurer est faible (inférieure à 0,50 m/s). La vitesse de déplacement du moulinet doit être beaucoup plus lente que la vitesse du courant. Pour fixer les idées, on peut adopter les valeurs suivantes avec un montage sur saumon :

$0{,}50 < V < 1{,}5$ m/s	v = 2 cm/s
$1{,}50 < V < 2{,}5$ m/s	v = 3 cm/s
$V > 2{,}5$ m/s	v = 4 à 5 cm/s

Notons avec M. ROCHE que pour une vitesse V de 1 m/s et une vitesse de descente v de 5 cm/s, vitesse déjà rapide et peu souvent utilisée, la composante oblique est de 1,0012 m/s, soit un écart de 1,2 °/₀₀ , ce qui est très faible. Ces chiffres sont donnés à titre indicatif pour montrer que le déplacement du moulinet n'altère que très faiblement la précision du jaugeage et non pour inciter les opérateurs à ne pas respecter les valeurs données ci-dessus.

III.3 1 3. Jaugeages par flotteurs lestés

On définit d'abord la section de mesure :

- avec un pont, les flotteurs sont placés à l'amont et récupérés à l'aval ; la vitesse moyenne est mesurée sur une longueur égale à la largeur du pont,

-en l'absence de pont, on peut tendre deux câbles parallèles à 4 ou 5 m l'un de l'autre et perpendiculaires à la direction générale du courant (opération très facile étant donné que les vitesses sont faibles). Les flotteurs sont mis à l'eau un peu au-dessus du câble amont et récupérés après leur passage sous le câble aval à l'aide d'un bateau.

La section choisie ne doit pas être encombrée par la végétation aquatique. Elle sera nettoyée avant chaque mesure. Le profil doit être aussi régulier que possible, aussi bien dans le sens longitudinal de façon à limiter les risques de frottement du flotteur sur le fond que transversalement. Mais en vue de parer à d'éventuelles irrégularités transversales, il faut se munir de flotteurs lestés de longueurs différentes ou de flotteurs de longueur réglable.

Les flotteurs doivent être immergés sur les 3/4 ou mieux les 4/5 de la profondeur. Ils seront placés sur 10 à 12 verticales réparties sur toute la largeur.

Les positions des flotteurs par rapport aux rives sont repérées sur les sections amont et aval grâce à des marques portées sur le pont ou sur les câbles. Le chronomètre est déclenché lors du passage à la verticale de la section amont et arrêté à la verticale de la section aval.

Avec des vitesses faibles, inférieures à 20 cm/s, cette méthode donne de très bons résultats et sa mise en oeuvre est relativement facile. Pour des vitesses fortes, il vaut mieux d'en tenir à des flotteurs de surface.

III. 3. 2. RÈGLES LIÉES AU MODE OPÉRATOIRE

Nous ne répèterons pas dans chaque cas que le moyeu de l'hélice ou le corps de l'appareil doit être rempli d'huile neuve avant la mesure et qu'il faut, avant de monter définitivement le moulinet, vérifier son bon fonctionnement en lançant l'hélice à la main.

III.3 2 1. Jaugeage à gué point par point

III.3 2 1 1. Préparation du matériel

- On utilisera de préférence une perche avec coulisse équipée d'un vernier de lecture. Le déplacement du moulinet est plus rapide et plus facile, la perche repose sur le fond pendant toute la durée de la mesure sur une verticale.

- Si l'on ne dispose pas de perche à coulisse, le moulinet est fixé directement sur la perche ronde de 20 mm graduée. On montera au sommet de la perche l'index montrant la direction du moulinet lors des mesures en eau trouble. Le moulinet sera placé aux différents points de la verticale en sortant chaque fois la perche de l'eau. On placera la perche toujours au même point de la section après les changements successifs de position du moulinet. Il faut éviter de déplacer le moulinet aux différents points de mesure en soulevant la perche : c'est une cause d'erreurs par suite de mouvements involontaires qui sont imprimés au moulinet durant le temps de mesure.

- Monter sur la perche la plaque de base convenant à la nature du fond : embout plat sur les fonds rocheux ou radiers en béton, plaque de base large pour fond de sable non consolidé ou de vase. Certaines perches sont livrées avec une pointe sous la plaque ; dans ce cas, avec des fonds rocheux ou de béton, la pointe entraîne une erreur de l'ordre de 3 cm dans l'estimation de la profondeur. A défaut d'embout plat, il faut ajouter ces 3 cm à la profondeur totale lors du report des points au dépouillement,

- En fonction du courant, choisir une hélice au pas convenable,

- Le moulinet sera équipé de préférence d'une hélice autocomposante,

- Monter le moulinet sur la perche, brancher le compteur et procéder à toutes les vérifications de bon fonctionnement. Ne pas oublier la pièce servant de butée et destinée à éviter le contact de l'hélice avec le fond,

- Matérialiser la section de mesure à l'aide d'un câble ou d'un double décamètre. Enlever, si possible, les grosses pierres situées dans la section.

III.3 2 1 2. Exécution de la mesure

- L'opérateur se place à l'aval du câble ou du décamètre jambes écartées et aussi éloignées que possible de la perche afin d'éviter de créer des remous au voisinage du moulinet ou de perturber l'écoulement.

- La perche est tenue à deux mains en position verticale Le moulinet est placé perpendiculairement à la section, s'il est équipé d'une hélice auto-composante. Avec une hélice ordinaire, on placera le moulinet parallèlement à l'axe de l'écoulement et on notera l'angle β que fait la direction du courant avec la perpendiculaire à la section. La perche doit être parfaitement immobile pendant toute la durée de la mesure.

- Choisir l'origine de la mesure en rive droite ou rive gauche, définir les positions des différentes verticales,

- A chaque verticale , lire directement la profondeur :

. sur le vernier avec la perche à coulisse lorsque le moulinet est placé l'axe de l'hélice à la surface de l'eau,

. directement sur la perche moulinet hors de l'eau en prenant soin de placer les graduations dans une zone non soumise à l'effet du remous. (figure 45).

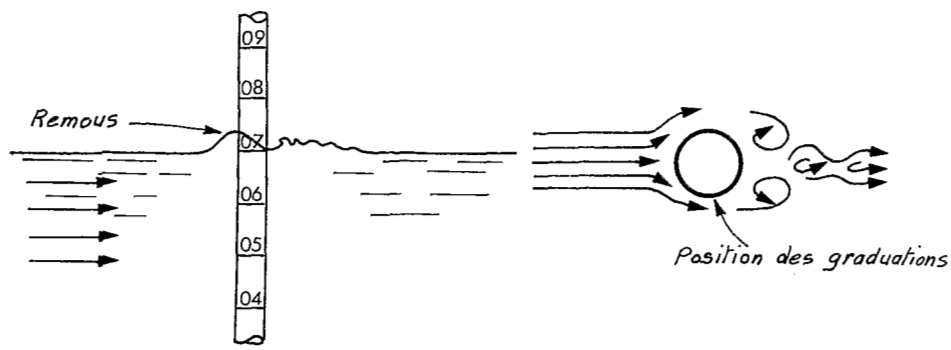


Fig-45

- Choisir les points de mesure comme indiqué plus haut et opérer en descendant de la surface vers le fond. Avec la perche ordinaire, prendre soin de la ramener au fond exactement en face du repère choisi pour chaque verticale après les changements de position du moulinet.

- Vérifier assez souvent, par exemple pendant les déplacements entre verticales, que le moulinet tourne correctement sous l'action du vent. En cas de frottements dus à l'entrée de grains de sable, procéder au nettoyage.

A la fin de la mesure, démonter le matériel, vider l'huile du moulinet, le nettoyer et noter les incidents éventuels et les réparations à faire.

III.3 2 1 3. Tenue du carnet

En général, un jaugeage à gué est réalisé par deux agents : un opérateur est dans l'eau et tient la perche, l'autre reste sur la berge (rivières jusqu'à 20 m de large) et manipule le compteur qui est relié au moulinet par un fil souple assez long et inscrit les résultats sur le carnet. Pour les grandes rivières, les deux opérateurs se tiennent dans l'eau.

Avant de commencer la mesure, on complète avec soin le cartouche de la page N° 1 comme le montre le modèle de feuille représenté par la figure 46.

Dans la colonne "Profondeurs : - mesurées, corrigée", on note la profondeur lue sur le vernier ou la perche. Il n'y a pas à corriger la profondeur à moins que la plaque de base munie de sa pointe soit utilisée sur un radier en béton (ajouter alors 3 cm).

RIVIERE : MANANANTANANA STATION : ISITONDROINA

JAUGEAGE du : 4.9.1976 Heure : - D : 10h - F : 11h05 Hauteur : -D : 0,35 -F : 0,36

Emplacement et nature de la section : au droit de l'échelle Fond Sableux (croquis au verso)

Mode opératoire : Agué - point par point. Compteur F6 n° 3340.

Matériel utilisé : Moulinet : O.T.T.C.31 N° 19668 Hélice n° Plastique pas : 0,25

Support : Perche + Coulisse Constante du saumon : /

Début de la mesure en : Rive droite Herbes sur 2m environ pas de courant

Position du zéro : au fond 1 top = 1 tour

Opérateur : RAVELOARIJAONA Célestin

Observations : Beau temps. Section définie par câble tendu, positions repérées à l'aide d'un compteur.

N°	Heure / Hauteur	Distance	Profondeurs : - mesurée - corrigée	Positions du moulinet	Angle α	Angle β	Nombre de tops	Nombre de tours	Temps s	N/T	V m/s	Observations
	R.D	à 0										de 0 à 2m herbes
1	10h	3,00	0.85	0,79			50	50	31,2			pas de courant
	0,35			0,65			50	"	32.0			
				0,44			50	"	34,2			
				0,23			50	"	40,1			
				0,08			20	20	24,4			
2		5,00	0,77	0,71			50	50	23,1			
				0,59			50	"	23,4			
				0,40			50	"	24,3			
				0,21			50	"	25.0			
				0,08			50	"	27,0			
3		9,00										
⋮												
14		53,00										
15		57,00	0,36	0,30		25°	20	20	26,1			
				0,17		25°	20	"	25,0			
				0,08		25°	20	"	28,4			
16	11h05	59,00	0,24	0,18		20°	20	20	27,2			
	0,36			0,08		20°	20	"	30,4			
	R.G	à 61m										

-Fig 46-

III.3 2 1 4. Conseils et erreurs à éviter

- Les limites raisonnables d'utilisation de la méthode de jaugeage à gué sont les suivantes : 1 m de tirant d'eau maximum, 1 à 1,20 m/s de vitesse en surface. Au-dessus de ces valeurs, il est très difficile de se maintenir dans l'eau et donc de faire des mesures correctes ; choisir un autre procédé de jaugeage.

- Dans tous les cas, éviter de choisir une section dans laquelle l'angle d'incidence du courant est supérieur à 30°. Au-delà de cette valeur, les corrections que l'on apporte risquent toujours d'être fortement erronées.

III.3 2 2. Jaugeage à gué par intégration

On utilise dans ce cas la perche AGAR III. Le déplacement du moulinet se fait du fond vers la surface, vitesse réglable de 0,5 à 2 cm/s. La Société OTT propose un montage avec perche ordinaire, équipée d'un treuil d'hydrologie avec ralentisseur ; ce montage est assez peu utilisé. Nous ne parlerons que de l'utilisation de la perche AGAR III.

III.3 2 2 1. Préparation du matériel

- Monter le moulinet, le placer sur la perche, puis fixer le boîtier après y avoir introduit les piles. Fixer le moulinet au ruban. Brancher le compteur.

- Faire un essai de fonctionnement. Régler la vitesse de montée avec le rhéostat en fonction de la vitesse du courant.

Il est inutile de monter une hélice auto-composante sur le moulinet.

- La section est matérialisée comme pour le jaugeage, point par point.

III.3 2 2 2. Exécution de la mesure

- La perche est tenue en prenant les mêmes précautions que lors du jaugeage point par point.

- A chaque verticale, poser la perche au fond, puis amener à l'aide de la manivelle la pièce de butée du moulinet (ou la partie inférieure de la dérive) en contact avec la surface de l'eau (figure 47). Mettre le compteur de profondeur à zéro.

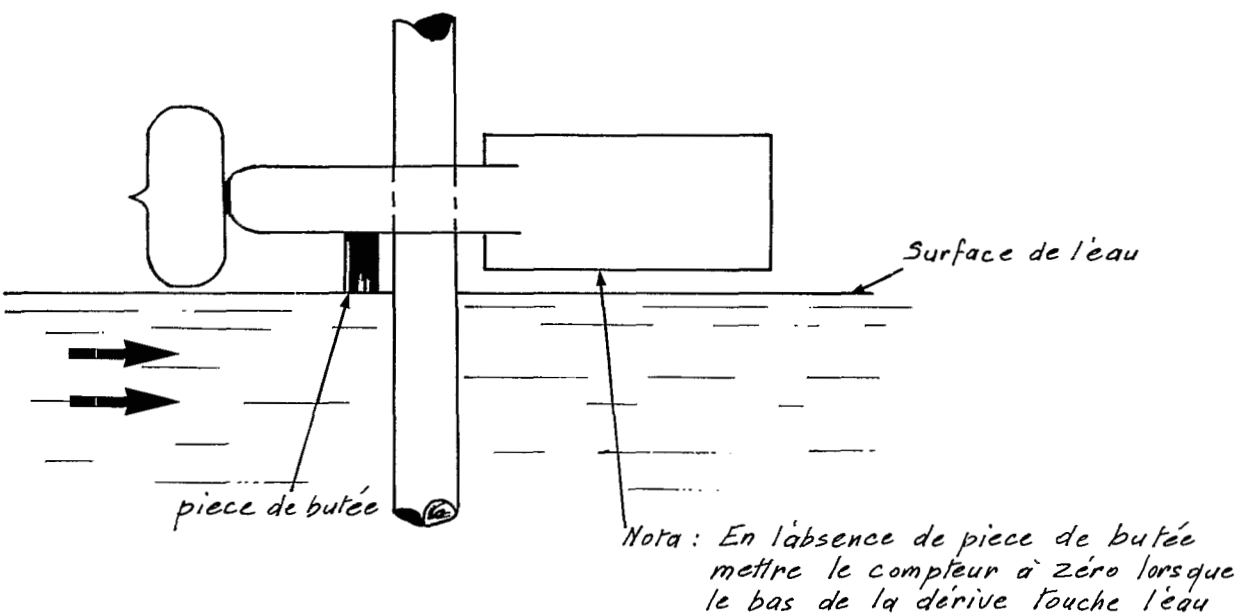

Surface de l'eau
piece de butée
Nota : En l'absence de piece de butée mettre le compteur à zéro lorsque le bas de la dérive touche l'eau

Fig-47 Mise à zéro du compteur de profondeur avec la perche AGAR III

- Faire descendre le moulinet au fond avec la manivelle. Veiller à ce que le ruban de suspension soit bien tendu. Lire l'indication du compteur.

- Embrayer le moteur et mettre en route le moteur et le chronocompteur d'impulsions.

- Lorsque le compteur de profondeur affiche un nombre égal au rayon de l'hélice, arrêter le moteur et le chronocompteur (opération effectuée par un bouton unique). Ceci revient à arrêter la mesure avant que l'hélice ne sorte de l'eau et ne soit influencée par le vent.

- Le moulinet s'oriente normalement dans l'axe du courant grâce à la dérive. Noter l'angle β ; s'il varie au cours de la montée, estimer une valeur moyenne de cet angle.

Noter le temps et le nombre de tours ou directement N/T suivant les compteurs utilisés.

- A la fin du jaugeage, démonter le matériel et ne pas oublier de retirer les piles du boîtier.

III.3 2 2 3. Tenue du carnet

- Compléter le cartouche comme indiqué pour le jaugeage point par point.

- En procédant comme il a été dit plus haut, il n'y a pas de correction à apporter à la profondeur.

- La colonne "positions du moulinet" n'est pas utilisée: (voir modèle de feuille sur figure 48)

III.3 2 2 4. Conseils et erreurs à éviter

- Avoir toujours un jeu de piles neuves dans le lot de matériel de rechange. Ne jamais stocker le boîtier avec les piles dans leur logement.

- Avec ce matériel, il faut éviter de jauger dans des rivières ayant une profondeur faible. Ne jamais opérer avec cette méthode avec des tirants d'eau inférieurs à 0,30 m.

RIVIERE : ZOMANDAO STATION : ANKARAMENA

JAUGEAGE du : 22.10.1976 Heure : - D : 9h10 - F : 9h55 Hauteur : -D : 0,24 -F : 0,24

Emplacement et nature de la section : 50m en amont de l'échelle. Graviers. (croquis au verso)

Mode opératoire : A. Gué. Par Intégration. Compteur CJR 100 n° 12.

Matériel utilisé : Moulinet : OTT C1 N° 19586. Hélice n° 3_24152. pas : 0,25

Support : Perche AGARIII. Constante du saumon : /

Début de la mesure en : Rive droite. écoulement régulier.

Position du zéro : en Surface 1 top = 1 tour

Opérateur : RAMAHANA Alfred.

Observations : Temps pluvieux. Section définie par un double décamètre

N°	Heure / Hauteur	Distance	Profondeurs : - mesurée - corrigée	Positions du moulinet	Angle α	Angle β	Nombre de tops	Nombre de tours	Temps s	N/T	V m/s	Observations
	R.Dt	0										
1		0,20	0,54							2,44		
2		0,40	0,76							2,38		
3		0,80	0,92							3,25		
4		1,20	0,86							3,04		
5		1,60	0,88							2,95		
14		5,20	0,47							2,24		
15		5,60	0,44							2,75		
16		5.80	0,48							2,02		
	R.Gauche	à 6,00 m.										

Fig 48

III.3 2 3. *Jaugeages à partir d'un pont ou d'une passerelle à l'aide d'une perche*

Suivant la vitesse du courant et la profondeur, on utilisera soit une perche ronde, soit une perche profilée qui sera montée soit sur un pied de perche, soit sur chariot treuil. Le deuxième montage est d'un maniement plus aisé. Les perches profilées sont quelquefois percées de trous espacés régulièrement sur toute leur longueur ; avec le pied de perche, ces trous sont utilisés pour bloquer la perche dans les différentes positions du moulinet à l'aide d'une goupille.

III.3 2 3 1. Préparation du matériel

- La section est matérialisée par le côté amont du pont ou de la passerelle sur lequel ont été répérées les verticales avec des traits à la peinture.

- Le pied de perche est déplacé à la main d'une verticale à l'autre (peu pratique). Le chariot treuil roule sur des galets guidés, dans certains montages, par des rails.

- Monter le matériel : le moulinet avec hélice autocomposante (noter la distance C séparant l'axe du moulinet du bout inférieur de la perche : de l'ordre de 10 cm), la perche dans le pied de perche ou le chariot, le compteur, faire les branchements puis les vérifications de fonctionnement.

III.3 2 3 2. Exécution de la mesure

- Avec le pied de perche, on opèrera uniquement point par point. Avec le chariot treuil, on peut jauger point par point ou par intégration si la perche est suffisamment lourde.

- Repérer l'origine de la mesure en rive droite ou rive gauche par rapport aux marques portées sur le pont ou la passerelle, ou sur le décamètre.

- se placer à la verticale N° 1 ●si jaugeage point par point:

. avec le pied de perche amener le moulinet axe de l'hélice à la surface, lire la graduation se trouvant devant l'index (L_1). Descendre ensuite la perche au fond, lire la graduation devant l'index (L_2). La profondeur est donnée par : $p = L_2 - L_1 + C$,

. avec le chariot treuil, mettre le compteur de profondeur à zéro lorsque le moulinet a l'axe de l'hélice à la surface de l'eau. Descendre au fond et lire l'indication du compteur. Ajouter C à cette lecture pour avoir la profondeur réelle.

Dans les deux cas, remonter le moulinet en répartissant les points de mesure.

●Si jaugeage par intégration :

. avec le chariot treuil, mettre le compteur de profondeur à zéro, l'axe de l'hélice étant à la surface de l'eau, remonter légèrement la perche puis la laisser descendre d'un mouvement continu avec le ralentisseur. Déclencher le chronocompteur lorsque le compteur de profondeur passe à zéro. L'arrêter dès que la perche touche le fond. Noter le temps, les tops et la profondeur.

Nota : quel que soit le montage, le moulinet est toujours placé perpendiculairement à la section avec l'hélice autocomposante.

III.3 2 3 3. Tenue du carnet

- La figure 49 montre comment seront inscrits les résultats dans le cas d'un jaugeage à l'aide d'un pied de perche ou d'un chariot treuil.

- Dans les deux cas , il ne faut pas oublier de noter la valeur de la constante C. Pour éviter des erreurs, on peut prendre l'habitude de donner à C la valeur 10 cm.

III.3 2 3 4. Conseils et erreurs à éviter

- Maintenir les supports en parfait état de fonctionnement et veiller particulièrement au graissage des divers galets et paliers.

- Dans les régions soumises à des orages violents, se rappeler que la perche plongée dans l'eau constitue un excellent paratonnerre. Eviter de jauger sous l'orage.

III.3 2 4. *Jaugeages à partir d'un pont à l'aide d'un moulinet monté sur saumont*

III.3 2 4 1. Préparation du matériel

- Le saumon est manoeuvré dans ce cas, soit à l'aide d'une potence rudimentaire, d'un porte-à-faux monté sur véhicule, d'une cyclopotence manuelle ou électrifiée. On peut jauger soit point par point, soit par intégration, si l'on dispose d'un ralentisseur pour le treuil simple d'hydrologie. Avec la cyclopotence électrifiée et suivant le compteur d'impulsions, dont on dispose, on peut jauger par intégration, soit en montant, soit en descendant.

- Choisir la section de mesure : aval ou amont du pont ? Avec des vitesses faibles et tant que l'angle de dérive ne dépasse pas 10°, on peut jauger à l'amont du pont, l'écoulement est toujours meilleur qu'à l'aval. Dès que l'angle de dérive α devient supérieur à 10°, amenant des risques de frottement du câble électroporteur avec le parapet, on doit jauger à l'aval du pont (resserrer un peu les verticales dans les zones de remous au droit des piles).

RIVIERE : ONILAHY STATION : TONGOBORY

JAUGEAGE du : 1.1.1977 Heure : - D : 9"20 - F : 10"50 Hauteur : -D : 1,20 F : 1,25

Emplacement et nature de la section : Passerelle au droit de l'échelle (croquis au verso)

Mode opératoire : Jaugeage à la perche à partir de la passerelle point par point

Matériel utilisé : Moulinet : OTT C31 N° 19668 Hélice n° Plastique pas : 0,25

Support : Perche + Chariot treuil ou Perche + Pied de perche Constante du fond : 0,10 m

Début de la mesure en : Rive gauche

Position du zéro : à la surface 1 top = 1 tour

Opérateur : RAZAFY

Observations : Compteur CJR22 Formule de tarage V = 0,2485 n + 0,006

Temps préélectionné sur le compteur T = 24,8 secondes

N°	Heure / Hauteur	Distance	Profondeurs : - mesurée / - corrigée	Positions du moulinet	Angle α	Angle β	Nombre de tops	Nombre de tours	Temps s	N/T	V m/s	Observations
	RG à	0										
1	9H20	1,00	1,43	1,43			34		24,8		0,346	chariot-treuil avec
	1,20		1,53	1,17			45		"		0,456	compteur de
				0,78			58		"		0,586	profondeur.
				0,39			67		"		0,676	
				0,10			62		"		0,626	
2		2,00	2,58 (1)	(4) (5)								avec pied de perche
			3,75 (2)	3,75 1,17			48		24,8		0,486	(1) 1ère lecture en S
			1,17	3,54 0,96			51		"		0,516	(2) 2ème lecture au fond.
			1,27 (3)	3,29 0,64			52		"		0,526	(3) Profond. Corrigée
				2,90 0,32			57		"		0,576	(4) Position moulinet
				2,68 0,10			51		"		0,516	lue en face index
3		4,00										(5) Position réelle
⋮		⋮										
14		26,0										
15		28,0	2,60 (1)	(4) (5)								Avec pied de perche
			3,96 (2)	3,96 1,36			33		24,8		0,336	
			1,36	3,71 1,11			40		"		0,406	
			1,46 (3)	3,33 0,73			42		"		0,426	
				2,96 0,36			38		"		0,386	
				2,70 0,10			37		"		0,376	
16		29,0	0,86	0,86			30		24,8		0,306	chariot treuil avec
			0,96	0,71			32		"		0,326	compteur de
				0,48			37		"		0,376	profondeur.
				0,25			40		"		0,406	
				0,10			38				0,386	

R.D. à 31 m.

- Fig 49 -

- Repérer les verticales, soit par des marques sur le pont, soit à l'aide d'un double décamètre tendu.

- Monter tout le matériel (potence ou porte-à-faux), y adapter tous les accessoires. Ne pas oublier de faire passer le câble électroporteur dans l'indicateur d'angle vertical. Brancher le compteur et vérifier le fonctionnement du moulinet et du contact de fond.

III.3 2 4 2. Exécution de la mesure

- Repérer l'origine du jaugeage en rive droite ou rive gauche par rapport aux marques ou au décamètre.

- Placer l'équipement de mesure à la verticale N° 1 :

. Si le courant est faible et l'angle α inférieur à 10°, faire descendre le saumon et placer l'axe de l'hélice à la surface de l'eau. Mettre le compteur du treuil à zéro. Jaugeage point par point, descendre jusqu'au fond et mesurer la profondeur. Mesurer les vitesses en remontant le moulinet aux différents points.

Si jaugeage par intégration (treuil équipé du système de ralentissement ou cyclopotence électrifiée) après avoir mis le compteur de profondeur à zéro, remonter légèrement le saumon, puis le faire descendre à vitesse constante. Déclencher le chrono-compteur lorsque le compteur passe à zéro. L'arrêter lorsque le contact de fond se ferme lorsqu'il touche le lit. Noter le temps et le nombre de tops. Remonter légèrement le saumon afin d'ouvrir le contact de fond et compter le nombre de tours effectués par l'hélice pendant le temps t qu'elle mettrait pour atteindre le fond ($t = \frac{\text{constante du saumon}}{\text{vitesse de descente}}$).

Noter: t, le nombre de tours ainsi que la profondeur.

. Si le courant est fort et l'angle α de dérive important, on opèrera de la façon suivante : mesurer la distance d séparant le point de suspension et la surface de l'eau (compteur du treuil à zéro lorsque le saumon est remonté au maximum, attache au niveau de la poulie ; lecture du compteur réalisée lorsque la semelle du contact affleure la surface). La distance d est notée dans la colonne "observations" : Mettre ensuite le compteur du treuil à zéro et opérer comme ci-dessus, soit point par point, soit par intégration. Lorsque le moulinet est au fond, on note la distance y lue sur le compteur du treuil et l'angle α .

- Répéter ainsi les mesures pour toutes les verticales.

- Veiller à ce que les débris (herbes ou branches), charriés en surface, ne viennent s'accrocher au câble, ce qui, d'une part fausserait la valeur de l'angle α et d'autre part risquerait de détériorer le matériel de mesure.

- Lorsque le moulinet est en surface (dans le cas de vitesses lentes seulement, en effet cette mesure ne nous semble pas utile en cas de fortes vitesses), noter l'angle β de l'axe du saumon avec la perpendiculaire à la section.

III.3 2 4 3. Tenue du carnet

- Compléter le carnet avec tous les renseignements utiles. Ne pas oublier de noter la constante du saumon.

- La figure 50 montre un exemple de feuille dans différents cas.

- La distance d, longueur du câble exondé, est notée dans la colonne observations.

III.3 2 4 4. Conseils et erreurs à éviter

- Toujours adapter la masse du saumon à la capacité du treuil ou de la cyclopotence dont on dispose.

RIVIERE : IKOPA STATION : Pont de MAHITSY

JAUGEAGE du : 12.12.1976 Heure : - D : 8"30 - F : 10"40 Hauteur : -D : 2,40 -F : 2,44

Emplacement et nature de la section : Pont (croquis au verso)

Mode opératoire : Jaugeage à partir du pont moulinet monté sur saumon - 25 kg.

Matériel utilisé : Moulinet : NEYRPIC N° 1836 Hélice n° Plastique pas : 0,20 m.

Support : Cyclopotance Constante du saumon : 0,15 m.

Début de la mesure en : Rive droite

Position du zéro : à la Surface 1 top = 1 tour

Opérateur : RAMANANANTOANDRO.

Observations : Temps pluvieux Légère crue d = Longueur du câble incliné.
Compteur CJR 22 Point par Point → T = 22,6 s car V = 0,2261 n + 0,015

N°	Heure / Hauteur	Distance	Profondeurs : - mesurée - corrigée	Positions du moulinet	Angle α	Angle β	Nombre de tops	Nombre de tours	Temps s	N/T	V m/s	Observations
	RD à	0										
1	8"30	5,0	3,27	3,25	8°		48	48	22,6		0,495	Point par
	2,40		3,42	2,62			53	53	"		0,545	point
				1,68			60	60	"		0,615	Nota: zéro compteur de
				0,74			65	65	"		0,665	profondeur hélice
				0,10			57	57	"		0,585	axe à la surface
2		10,00	3,54		8°		690		118"4		1,344	Intégration
			3,69				+ 8		+ 5"			→ Heure au fond.
3		20,00	4,37 (y)		26°		1320		145,7		2,20	d = 8,00 m.
			x = 0,90							Pour Vert. 3 et 4		Intégration. Pas de mesure au fond.
			u = 0,12									x = 1ère correction
			p = 3,35									u = 2ème correction
4		30,00	8,24 (y)		30°		2267		244"3		2,16	d = 8,10 m.
			x = 1,24									Nota:
			u = 0,33									Pour verticales 3,4,5
			p = 6,67									zéro compteur profondeur
				(1) (2)								semelle contact de
												fond augmenté à
												la surface.
5	8"50	40,00	7,13 (y)	7,10 6,31	22°		184		22,6		1,855	d = 7,95 m
	2,41		x = 0,63	5,73 4,71	"		197		"		1,985	(1) lectures compteur
			u = 0,16	3,68 2,81	"		212		"		2,135	(2) Positions réelles
			p = 6,34	1,50 1,24	14°		231		"		2,325	
				0,95 0,10	≈0		208		"		2,095	
6		50,00										

- Fig 50 -

N°	Heure / Hauteur	Distance	Profondeurs : - mesurée - corrigée	Positions du moulinet	Angle α	Angle β	Nombre de tops	Nombre de tours	Temps s	N/T	V m/s	Observations
8		60										
9	9"40	70	5,54(4)		20°		1431		180,2		1,815	d = 8,50 m.
	2,42		α = 0,54				+30		+ 5"			Intégration avec mesure au fond
			u = 0,10									Nota : Dans ce cas comme pour Verticales 3, 4 et 5 le compteur est lancé lorsque l'hélice du moulinet entre dans l'eau (compteur de profondeur = 0,15)
			p = 4,90									
14	.	130								(1)	(2)	
15		140	4,27	4,25	6°		122		22,6	1,235		Point par point.
			4,42	3,42			146		"	1,475		(1) vitesse calculée
				2,17			154		"	1.555		(2) vitesse corrigée en fonction de l'angle β.
				0,92			160		"	1.615		
				0,10	0°	20°	137		"	1.385		
16	10"40	145	2,59	2.55	0°		75		22,6	0.765		
	2,44		2,74	2.05			87		"	0.885		
				1.30			90		"	0.915		
				0.55			95		"	0.965		
				0.10		15°	91		"	0.925		
	R.G à 152 m.											

- Fig 50 -

- Prendre, compte tenu de cette capacité, le saumon le plus lourd possible accroché à un câble électroporteur dont le diamètre est le plus petit possible. Nous répétons que la traînée du câble est plus importante que celle du saumon. Pour une même vitesse de l'eau, un saumon de 100 kg avec un câble de 6 mm donnera un angle de dérive α plus grand qu'un saumon de 25 ou 50 kg avec un câble de 3 mm.

- Avec le montage sur saumon, il est inutile d'utiliser une hélice auto-composante.

- Bien surveiller l'arrivée des corps flottants (arbres ou autres) et ne pas hésiter à remonter l'équipement de mesure lorsqu'il y a doute sur la direction de la trajectoire et risque de collision.

- Avec un porte-à-faux sur véhicule, vérifier, avant de commencer la mesure, si le trottoir du pont est capable de supporter l'ensemble. Placer à l'entrée et à la sortie du pont les panneaux de signalisation règlementaire (même précaution avec la cyclopotence).

- Ajoutons, pour terminer, quelques conseils relatifs aux jaugeages par intégration, conseils qui sont d'ailleurs valables avec tous les modes opératoires utilisant un moulinet monté sur saumon :

. avant de commencer la mesure (avec saumon) faire un essai de descente pour ajuster la vitesse aux conditions locales d'écoulement et aussi pour vérifier que le saumon reste bien horizontal pendant la descente. S'il se produit un déséquilibre, modifier la position des ailettes d'équilibrage.

. avec les chronocompteurs à chiffres sauteurs, le chronomètre tourne encore , lorsque le contact de fond se ferme. Bien synchroniser l'arrêt du chronocompteur avec la fermeture du contact de fond pour éviter les erreurs pouvant entraîner une sous-estimation du débit. Cette cause d'erreur est évitée avec le compteur CJR 100.

. de même, il est nécessaire de faire démarrer le compteur au moment précis où le compteur de profondeur passe à zéro.

. lorsque les circonstance le permettent (eaux moyennes, vitesses lentes), on peut doubler systématiquement la mesure à chaque verticale.

. Il arrive souvent que la formule de tarage des moulinets ne soit pas la même pour toutes les valeurs de n (nombre de tours par seconde). La discontinuité se produit pour des valeurs assez faibles de n, donc pour des valeurs de la vitesse du courant pour lesquelles la méthode ne doit pas être appliquée. En pratique, dans une section où le jaugeage par intégration est possible, les zones à courants faibles sont peu importantes. De ce fait, l'utilisation de la formule correspondant aux valeurs supérieures de n, n'introduit pas d'erreur sensible dans la mesure.

. Dans une même section en travers, on peut trouver une zone favorable au jaugeage par intégration et une zone défavorable par suite de profondeurs ou de vitesses trop faibles. Dans ce cas, il ne faut pas hésiter à jauger point par point dans la zone défavorable au jaugeage par intégration.

. Veiller, durant toute la mesure, sur une même verticale, à ce que la vitesse de descente soit parfaitement constante.

. Choisir une vitesse de descente (ou de montée) d'autant plus lente que la vitesse du courant est plus faible et assurant en fonction de la profondeur, de l'hélice utilisée et de la vitesse du courant, une mesure pendant un temps suffisamment long : 60 secondes au moins.

. Par forte crue, avec beaucoup de transports en surface et un charriage de fond important, il est conseillé de négliger la mesure de vitesse de fond : la précision qu'on obtient en faisant cette mesure ne vaut pas le risque de perdre ou de détériorer le matériel en le maintenant trop longtemps au fond.

III.3 2 5. Jaugeage à l'aide d'un bateau léger

III.3 2 5 1. Préparation du matériel

- En général, le bateau est transporté dégonflé dans un véhicule. La première opération, arrivés à la station de jaugeage, est le montage du bateau, puis mise à l'eau, montage du moteur et essais. Choix de la section de mesure et des ancrages du câble.

- Mise en place sur la berge, du treuil contenant le câble définissant la section. Vérifier que le système de démultiplication est bien débrayé, que le cliquet est bien fixé et ne risque pas de venir bloquer intempestivement le touret et que le frein est bien desserré. Un agent reste près du treuil pour surveiller le fonctionnement pendant la traversée et mettre le câble sous tension.

- Traverser le câble : pour cela, une certaine longueur de câble est lovée au fond du bateau et un opérateur tient le brin équipé du mousqueton. Le deuxième opérateur manoeuvre le moteur et tient en même temps le câble venant du treuil. Il démarre le moteur et se dirige le plus vite possible vers la berge opposée. Il règle la puissance du moteur en fonction de la tension que lui transmet le câble. Il faut essayer d'aller le plus vite possible pour éviter une immersion trop rapide du câble qui, venant reposer au fond, demandera un effort de traction plus important. Arrivé sur la berge opposée, le bateau est maintenu contre la berge par le moteur. L'opérateur tenant le brin libre du câble met pied à terre et se dirige rapidement vers le point d'amarrage. Dès que le câble est fixé, il est commandé à l'opérateur resté près du treuil de freiner le tambour et de commencer la mise en tension. Pendant ce temps, le bateau revient le long du câble, moteur arrêté, pour le soulever et le décrocher éventuellement du fond. Cette manoeuvre est nécessaire car le câble étant pris dans le fond,

traction du treuil risque d'amener sa rupture si l'on ne prend soin de le dégager avec le bateau.

La tension est réalisée progressivement, sans à-coups, en particulier au moment où le câble sort de l'eau. Le câble est mis sous tension avec le minimum de flèche.

- Cette opération étant réalisée, le bateau revient vers la berge et on procède au montage du matériel de mesure. Mettre en place le chariot largable à l'avant, monter le porte-à-faux, le treuil, le moulinet et le saumon, brancher le compteur et faire les vérifications de fonctionnement.

III.3 2 5 2. Exécution de la mesure

- Amener le bateau en rive droite. le saumon étant à la verticale de la rive, mettre le compteur de distance à zéro.

- Déplacer le bateau jusqu'à la première verticale et opérer soit point par point, soit par intégration, comme il a été indiqué plus haut.

- En cas de fortes vitesses, mesurer à chaque verticale la distance d entre le point de suspension et la surface de l'eau.

- Répartir les verticales comme il a été indiqué ci-dessus.

- Arrivé en rive gauche, estimer la largeur totale de la rivière : indication du compteur + distance entre le saumon et la rive lorsqu'il n'est plus possible de déplacer le bateau.

- Deux opérateurs, avec ce montage, peuvent effectuer un jaugeage, même dans les conditions les plus difficiles. Un opérateur manoeuvre le treuil et l'autre assis à l'avant, tient le carnet et déplace le bateau.

En cas de danger (corps flottants), l'opérateur assis, sur le boudin tribord, vers l'avant du bateau, peut, à l'aide du levier de déclenchement, séparer le chariot de translation du dispositif de fixation au canot. Le bateau dérive alors à la vitesse du courant, le chariot restant fixé au câble. Le danger ayant disparu, on vient se fixer au chariot à l'aide du moteur et on reprend la mesure.

III.3 2 5 3. Tenue du carnet

Le carnet est tenu de façon identique à celle indiquée pour les jaugeages avec saumon à partir d'un pont.

III.3 2 5 4. Conseils et erreurs à éviter

- Avec une embarcation pneumatique, il est dangereux et donc déconseillé :

. de placer le saumon à l'avant du bateau car il y a déséquilibre important et risque d'entrée d'eau, par l'avant, même pour des vitesses relativement faibles.

. de fixer le canot à un câble en travers sans moteur à l'arrière. En effet, dans ces conditions, si un opérateur se trouvant seul sur le bateau, se porte vers l'avant, il y a risque de chavirement. Le canot pneumatique peut, sous l'action du courant, tourner autour du câble (déjà vu en France avec des vitesses de l'ordre de 1 m/s).

. de fixer le bateau à un câble de façon rigide.

- Les embarcations pneumatiques modernes, avec les aménagements que nous avons décrits, sont parfaitements adaptées à la mesure des débits en rivière et les hydrométristes n'ont, à notre avis, pas besoin de se compliquer la tâche avec des canots métalliques, plastiques ou autres "montages en portière". Les performances de ce matériel (stabilité, flottabilité, tirant d'eau....) ne sont pas comparables et de

loin, à celles des canots pneumatiques.

- Ne jamais monter un saumon dont la masse est supérieure à 25 kg sur une embarcation légère.

- Il faut toujours se rappeler que l'équipement léger ne doit pas être utilisé en toutes circonstances : au-dessus de 3 m/s, il faut trouver autre chose.

III.3 2 6. *Jaugeage avec bateau et cercle hydrographique*

La différence entre cette méthode et celles que nous avons décrites plus haut réside essentiellement dans la façon de repérer les verticales. Les sections dans lesquelles cette méthode est utilisée ont plus de 300m de large ; elles peuvent atteindre parfois 1 à 2 km. La mesure des vitesses se fait sur chaque verticale, soit point par point, soit par intégration. La méthode de jaugeage continu ou par verticales indépendantes ne peut pas être appliquée car, d'une part le choix de verticales fixes, toujours les mêmes est difficile par suite du procédé de repérage utilisé, et d'autre part, vu les dimensions des cours d'eau, les variations de la cote sont toujours relativement lentes.

La méthode la plus utilisée jusqu'à présent pour repérer les verticales, est celle basée sur l'utilisation du cercle hydrographique. Cette méthode a été décrite par M. ROCHE dans Hydrologie de Surface, pages 197 et 198. Des modifications et améliorations ont été apportées par G. JACCON "Nouvelle méthode de jaugeage au cerche hydrographique" ORSTOM Note technique N° 11, et par J. CALLEDE "Le cercle hydrographique". Nous reprendrons ci-dessous quelques indications et conseils importants donnés dans ces notes.

III.3 2 6 1. Principe de la méthode de jaugeage au cercle

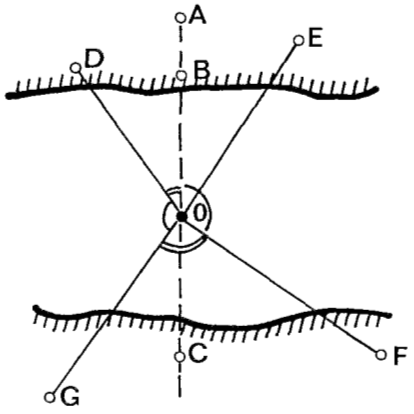


Fig.51

0 se trouve à l'intersection des arcs capables de DÔB BÔE EÔF etc

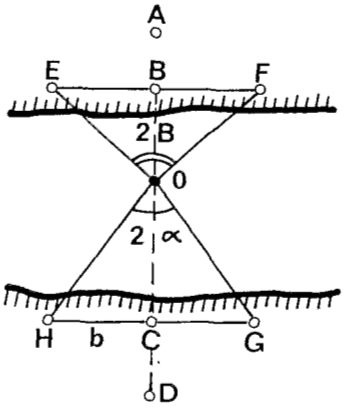


Fig.52

$0C = D$
$BF = BE = CG = CH = b$
$\operatorname{tg}\alpha = \frac{b}{D}$

La figure 51 en schématise le principe : les repères A, B et C matérialisent la section et les repères D, E, F et G servent à déterminer la position 0 de la verticale de mesure. En effet, la mesure des angles DOB, BOE, EOF, FOG et GOD permet de définir le point 0, point de concours des arcs capables correspondants. Le report graphique des angles est fait avec un rapporteur hydrographique; c'est une opération longue et fastidieuse qui est, pour une large part, la cause de l'hostilité des hydrologues à cette méthode. Tous les repères font l'objet d'un lever topographique précis.

Un autre procédé pour déterminer la position des verticales consiste à reporter sur un papier calque au rapporteur ordinaire, les angles mesurés à partir de 0. Ce calque est superposé au dessin sur lequel figurent les balises et par tâtonnements on essaie de placer par transparence sur les côtés des angles les balises correspondantes.

Lorsque la coïncidence est bien réalisée, on pique le point O pour le repérer définitivement sur la section.

III.3 2 6 2. Amélioration de la méthode

Dans la méthode classique, les balises de position D, E, F, G, sont placées où l'on peut sur les deux berges, sans souci d'alignement ou d'orthogonalité avec la section en travers. G. JACCON a eu l'idée de placer ces balises comme représenté sur la figure 52, c'est à dire que les repères E, F et G, H sont placés sur chaque berge sur deux droites perpendiculaires à la section. La distance entre chaque repère et la section est la base b dont la valeur dépend de la largeur de la rivière.On peut adopter une base de 200 m pour 250 et 600 m et une base de 400 m au-dessus de 600 m de large. La position du point O est fixée par la connaissance de l'angle α d'après la relation :

$$OC = GC \cot g \alpha$$

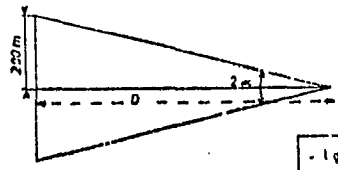
Une seule mesure d'angle (en pratique on mesure 2α) suffit à définir la position de O. L'opérateur connaît immédiatement la distance OC à l'aide d'un tableau donnant la valeur de 2α pour des valeurs de OC variant de 5 m en 5 m.

Le tableau IV correspond donc au cas idéal où il est possible de tracer deux droites EF et GH rigoureusement perpendiculaires à la section BC et où les distances EB, BF, GC et GH sont égales. Il peut arriver qu'une telle implantation ne soit pas possible. On peut avoir les dispositions suivantes : figures 53 et 54.

JAUGEAGE AU CERCLE HYDROGRAPHIQUE

Tab. IV

TABLEAU DES DISTANCES ET DES ANGLES CORRESPONDANTS A UNE BASE DE 400 m



$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\text{Demi-base}}{D} = \frac{200}{D}$$

$$\log D = \log 200 - \log \operatorname{tg}\alpha$$

$$\log \operatorname{tg}\alpha = \log 200 - \log D$$

(D en mètres)

D	2 α	D	2 α	D	2 α	D	2 α
0	180°00'	100	126°52'	200	90°00'	300	67°23'
5	177°08'	105	124°36'	205	88°35'	305	66°31'
10	174°16'	110	122°23'	210	87°12'	310	65°39'
15	171°25'	115	120°12'	215	85°52'	315	64°50'
20	168°35'	120	118°04'	220	84°32'	320	64°01'
25	165°45'	125	115°59'	225	83°16'	325	63°13'
30	162°56'	130	113°57'	230	82°00'	330	62°26'
35	160°09'	135	111°58'	235	80°48'	335	61°41'
40	157°23'	140	110°01'	240	79°37'	340	60°54'
45	154°38'	145	108°07'	245	78°27'	345	60°12'
50	151°56'	150	106°16'	250	77°19'	350	59°29'
55	149°15'	155	104°27'	255	76°12'	355	58°48'
60	146°36'	160	102°41'	260	75°08'	360	58°07'
65	144°20'	165	100°57'	265	74°05'	365	57°26'
70	141°26'	170	99°16'	270	73°03'	370	56°47'
75	138°53'	175	97°38'	275	72°03'	375	56°09'
80	136°24'	180	96°02'	280	71°04'	380	55°31'
85	133°57'	185	94°28'	285	70°07'	385	54°54'
90	131°33'	190	92°56'	290	69°11'	390	54°18'
95	129°11'	195	91°21'	295	68°16'	395	53°43'

D	2 α	D	2 α	D	2 α	D	2 α
400	53°08'	600	36°52'	800	28°04'	1000	22°37'
405	52°33'	605	36°35'	805	27°54'	1005	22°31'
410	52°00'	610	36°18'	810	27°44'	1010	22°24'
415	51°28'	615	36°02'	815	27°35'	1015	22°19'
420	50°56'	620	35°45'	820	27°25'	1020	22°11'
425	50°24'	625	35°29'	825	27°15'	1025	22°05'
430	49°53'	630	35°14'	830	27°06'	1030	21°59'
435	49°23'	635	34°58'	835	26°55'	1035	21°52'
440	48°53'	640	34°43'	840	26°47'	1040	21°46'
445	48°24'	645	34°27'	845	26°38'	1045	21°40'
450	47°55'	650	34°12'	850	25°29'	1050	21°34'
455	47°27'	655	33°58'	855	26°20'	1055	21°28'
460	46°59'	660	33°43'	860	26°11'	1060	21°22'
465	46°32'	665	33°29'	865	25°02'	1065	21°16'
470	46°05'	670	33°14'	870	25°54'	1070	21°10'
475	45°40'	675	33°01'	875	25°45'	1075	21°05'
480	45°14'	680	32°47'	880	25°37'	1080	20°59'
485	44°49'	685	32°33'	885	25°28'	1085	20°53'
490	44°24'	690	32°20'	890	25°20'	1090	20°48'
495	44°00'	695	32°07'	895	25°12'	1095	20°42'
500	43°36'	700	31°53'	900	25°03'	1100	20°37'
505	43°13'	705	31°41'	905	24°55'	1105	20°31'
510	42°50'	710	31°27'	910	24°47'	1110	20°26'
515	42°27'	715	31°15'	915	24°40'	1115	20°20'
520	42°05'	720	31°03'	920	24°32'	1120	20°15'
525	41°43'	725	30°51'	925	24°24'	1125	20°10'
530	41°21'	730	30°39'	930	24°16'	1130	20°04'
535	41°00'	735	30°27'	935	24°09'	1135	19°59'
540	40°39'	740	30°15'	940	24°01'	1140	19°54'
545	40°18'	745	30°03'	945	23°54'	1145	19°49'
550	39°58'	750	29°52'	950	23°47'	1150	19°44'
555	39°38'	755	29°41'	955	23°39'	1155	19°39'
560	39°18'	760	29°29'	960	23°32'	1160	19°34'
565	38°59'	765	29°18'	965	23°25'	1165	19°29'
570	38°40'	770	29°07'	970	23°18'	1170	19°24'
575	38°21'	775	28°56'	975	23°11'	1175	19°19'
580	38°03'	780	28°46'	980	23°04'	1180	19°14'
585	37°44'	785	28°35'	985	22°57'	1185	19°10'
590	37°27'	790	28°25'	990	22°51'	1190	19°04'
595	37°09'	795	28°15'	995	22°44'	1195	19°00'
						1200	18°56'

Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer | DIV_261 255

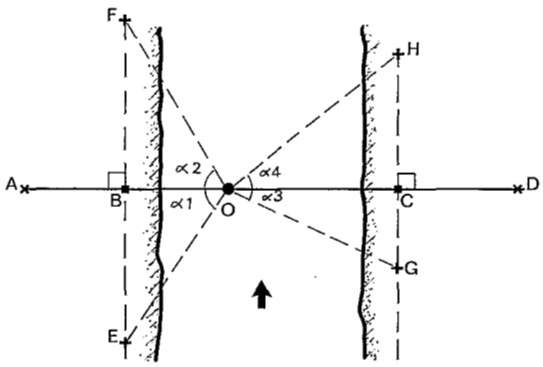


Fig_ 53

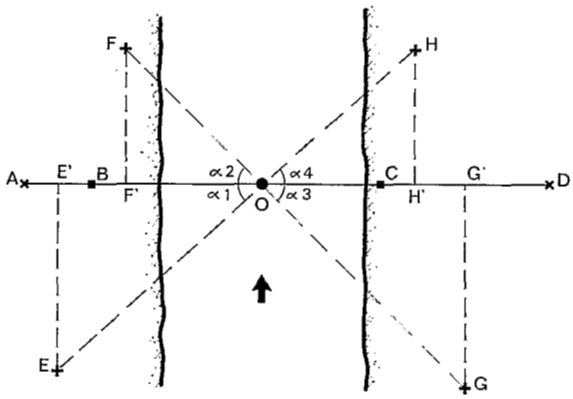


Fig_54

Il est bien évident que la première solution donne plus facilement et plus rapidement la position de O et il convient de l'adopter chaque fois que c'est possible.

III.3 2 6 3. Utilisation du cercle

- Mode d'emploi :

L'emploi du cercle et en particulier la réalisation de la coïncidence, nécessite, pour un débutant, un entraînement préalable de quelques heures. L'opération n'est pas évidente et l'on confond assez facilement les balises. Le viseur sans optique est d'un emploi plus facile. La lunette ne sera utilisée que pour les sections très larges. On opère de la façon suivante :

- monter le viseur de telle sorte que l'axe optique passe approximativement sur le sommet du miroir fixe (champ de visée directe égal au champ de visée réfléchie). Si l'on utilise la lunette, mettre au point, en tirant sur le tube oculaire, en visée directe, sur les balises.

- l'instrument étant supposé réglé, viser la balise de droite en visée directe. Débrayer l'alidade. Embrayer et tourner la vis tangente jusqu'à obtenir la coïncidence des deux balises.

- Lire le nombre de degrés en face de l'index et le complément en minutes sur le tambour.

- Réglage et entretien :

Les réglages suivant sont à effectuer, dans l'ordre, avant toute opération de jaugeage au cercle.

Vérification de la perpendicularité du grand miroir par rapport au limbe

Disposer deux équerres de réglage sur le limbe de telle sorte que l'une soit vue en visée réfléchie, dans le grand miroir, l'autre étant vue directement sur le bord du miroir sans utiliser ni viseur, ni lunette, comme indiqué sur la figure 55. Les arêtes supérieures des deux équerres doivent être alignées. Dans le cas contraire, les amener en coïncidence en agissant sur la vis de réglage située derrière le grand miroir.

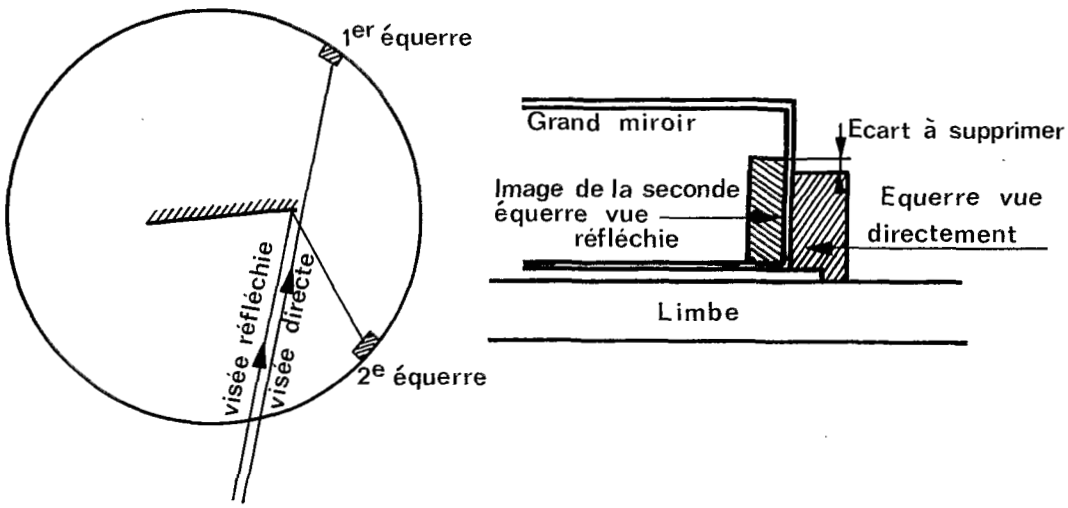


Fig-55 Réglage de la perpendicularité du grand miroir

Vérification et réglage de la parallaxe

Monter la lunette, puis mettre l'alidade à 0 (index et tambour), viser une ligne horizontale (arête de toiture ou fenêtre...) amener cette ligne dans la zone de coïncidence : il y a parallaxe si cette ligne se dédouble. Annuler la parallaxe en agissant sur la vis prévue à cet effet derrière le miroir (figures 56).

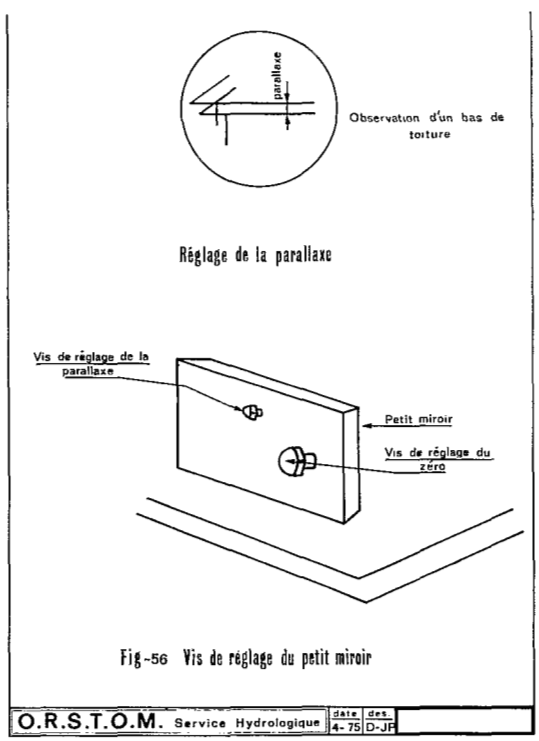


Fig-56 Vis de réglage du petit miroir

Vérification et réglage du zéro

Cette opération est à effectuer souvent, toutes les cinq ou six heures.

Mettre l'alidade à zéro, très soigneusement (index et tambour) viser une verticale bien nette. Les images directes et réfléchies doivent coïncider sinon agir sur la vis de réglage du zéro située derrière le petit miroir.

Entretien

Nettoyer les miroirs à l'eau savonneuse et les essuyer avec un linge doux; manipuler l'appareil avec soin. Ne jamais huiler la crémaillère mais enlever, avec une curette en bois, tout cambouis ou dépôt.

III.3 2 6 4. Installation des repères

Lorsque la section est adoptée , les repères A, B, C, D sont mis en place. L'alignement est réalisé aisément avec l'aide d'un niveau ou d'un théodolite.

Avec un théodolite placé en B puis en C, on détermine après rotation de 90° par rapport à AD, la direction des repères E,F puis G, H. Cette direction est jalonnée puis la distance correspondant à la demi-base choisie, piquetée et chaînée. On procède alors, sur les huit jalons mis en place, à des contrôles d'alignement et de direction (au cercle hydrographique réglé sur 90°).

Chaque point peut être matérialisé par une borne en béton de 50 cm de hauteur environ, dans laquelle est scellé un tube galvanisé de 50/60. La balise, elle-même, est constituée par un panneau de contreplaqué de 1 m x 2 m fixé verticalement sur un tube galvanisé de 40 x 49. Le panneau est peint en damiers blancs et rouges (dimension des carreaux : 50/50). Les mêmes panneaux peuvent être utilisés sur plusieurs stations.

La distance séparant les repères A et B ou C et D dépend, surtout de la place dont on dispose et de la végétation. Elle est, en principe, de l'ordre de 50 à 100 m. Il est très important que l'on puisse voir tous les repères en tous points de la section ou du moins lorsqu'on se trouve à plus de 50 m d'une rive. Entre 0 et 50 m, les mesures seront faites uniquement sur la base de la rive opposée.

III.3 2 6 5. Ancrage du bateau

C'est le point délicat pour les sections où les vitesses sont supérieures à 1,50 m/s. Il faut utiliser une ancre type DIAL dont le poids dépend de la dimension du bateau utilisé. Avec un Zodiac MARK II, on prendra une ancre de 10 à 20 kg montée sur une chaîne de 8 mm de 30 à 40 m de long ; la chaîne est plus efficace que la corde, car l'effet de la chaîne reposant sur le fond est au moins égal à l'effet de l'ancre pour la fixation du bateau sur fond sableux.

Le déplacement d'une verticale à l'autre se fait en procédant comme le montre la figure 57.

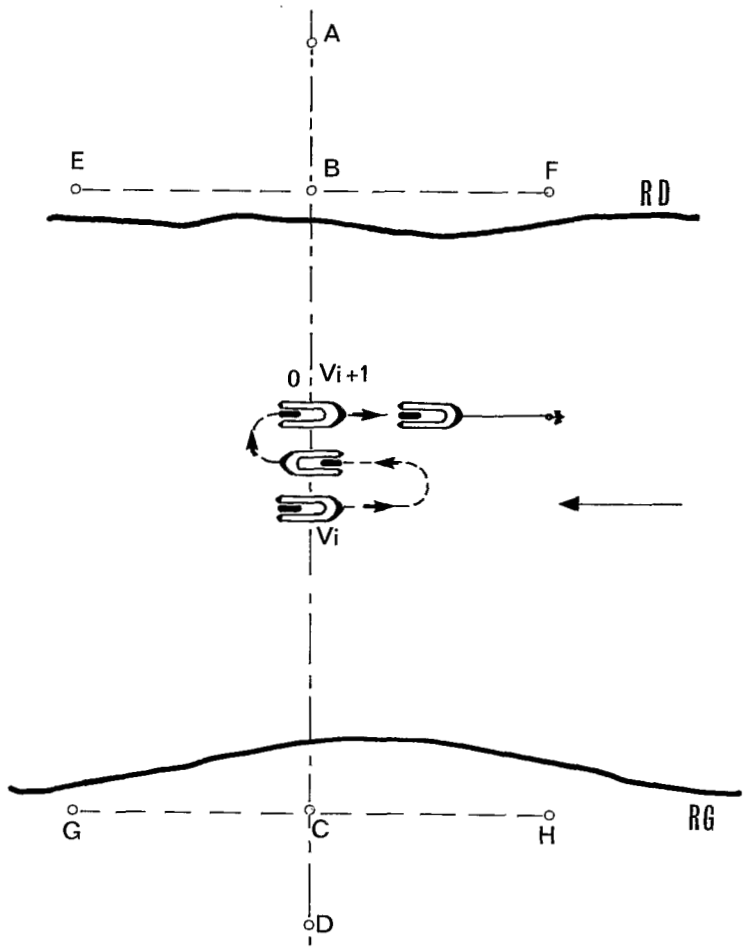


Fig. 57

Le bateau étant ancré sur la verticale Vi, on met en marche le moteur, puis on remonte le courant doucement pendant qu'un ou deux aides remontent la chaîne. On avance ainsi jusqu'à la verticale de l'ancre pour faciliter son décrochement. Puis l'ancre est ramenée sur le bateau. Le bateau décrit un S, comme il est indiqué sur la figure, et vient se placer au droit de la verticale Vi + 1, en amont de la section, la distance par rapport à la section dépendant de la profondeur et de la vitesse du courant. Pour que l'ancre ne décroche pas, il faut que la longueur de la chaîne immergée soit au moins égale à cinq fois la profondeur de la rivière.

On jette alors l'ancre en maintenant le bateau stationnaire par rapport à la berge, le moteur est ensuite mis au ralenti. Le bateau dérive doucement pour permettre à l'ancre d'accrocher le fond. Lorsque l'ancre tient, on laisse dériver en larguant la chaîne jusqu'à ce que le bateau soit dans l'alignement des repères A B C D. L'alignement est réalisé à la jumelle et vérifié sur les balises B et C à l'aide du cercle avec graduation à 180°. Cette dernière opération est parfois un peu superflue,car l'erreur introduite par un défaut d'alignement de l'ordre de 2 m est pratiquement négligeable.

III.3 2 6 6. Repérage de la verticale de mesure

Le bateau étant en position stable (ancre bien accrochée au fond), l'opérateur effectue alors les mesures des angles 2α et 2β L'angle 2α donne, à partir du tableau, la distance OC et l'angle 2β, la distance OB. L'opérateur contrôle immédiatement que :

- les lectures sont correctes si OB + OC est égal à la largeur totale mesurée une fois pour toutes d'après le lever topographique ou en mesurant 2α depuis B et 2β depuis C.

- l'intervalle avec la verticale précédente est acceptable.

III.3 2 6 7. Répartition des verticales de mesure

La largeur totale de la rivière peut être connue avant de commencer le jaugeage en mesurant les distances entre les bords rive droite et rive gauche et les points B et C. La répartition de verticales sera faite comme pour le jaugeage point par point. Une fois connus, les intervalles entre verticales, on peut, à l'aide du tableau, définir pour chaque verticale la valeur des angles 2α et 2β. Les déplacements du bateau se feront de façon à se trouver le plus près possible de ces valeurs. Avec un peu d'habitude, en réglant avant chaque déplacement, le cercle sur l'angle correspondant à la prochaine verticale, on arrive à se placer très près du point choisi. Pour faciliter cette opération, on peut utiliser deux bouées qui matérialisent chaque verticale successivement. La bouée 1 est laissée à la verticale N et la bouée 2 à la verticale N + 1. Lorsque N + 1 est terminée, on repasse à N pour récupérer la bouée 1 qui sera à nouveau immergée à N + 2. Cette méthode donne de bons résultats sur les rivières ne charriant pas trop de débris solides en surface.

III.3 2 6 8. Mesures des vitesses et conclusions

Lorsque le bateau est mis en place, les mesures de vitesse sont réalisées par la méthode point par point, soit par la méthode par intégration ou par les deux : en descendant par intégration, en remontant point par point.

Le matériel utilisé dépend des caractéristiques de la station : profondeur,vitesse de courant, etc... Dans une section peu profonde (3 à 5 m) avec des vitesses faibles, le matériel léger (Zodiac MARK II, Saumon 25 kg, etc...) pourra être utilisé tendis qu'avec des fonds importants et de grandes vitesses, il faudra disposer de bateaux plus grands et plus lourds capables de supporter des saumons de 100 kgs et des longueurs importantes de chaîne.

Avec cette méthode, les hydrologues de l'ORSTOM ont jaugé depuis 1951 l'Oubangui et aussi le Congo en amont de Brazzaville (débit jaugé 37 000 m3/s, voir POUYAUD, déjà cité page 72).

Quelle est la précision de cette méthode ?

Un opérateur entraîné obtient des mesures d'angle avec la précision d'une minute. Pour une base de 400 m, une minute correspond à une distance ΔL d'environ :

0,05 m à 100 m,
0,20 m à 500 m,
0,70 m à 1000 m.

L'erreur relative est donc inférieure à 1 %.

Les erreurs dues à un défaut d'alignement ou de lever topographique des bases sont également très faibles et le plus souvent inférieures aux erreurs de mesure du débit proprement dites ayant pour causes les irrégularités de la section ou la mauvaise répartition des vitesses.

III.3 2 6 9. Tenue du carnet

On précisera au dos de la feuille la position des balises avec les repères utilisés pour la mesure des angles de façon à ne pas faire d'erreurs lors du report des points.

La colonne "distance" sera utilisée pour noter les différentes valeurs des angles.

Un exemple de feuille de mesure est donné sur la figure 58.

RIVIERE : MANGOKY STATION : AMBOHIMENAFIFY

JAUGEAGE du : 31.08.1976 Heure : - D : 8H - F : 11H50 Hauteur : -D : 1,81 -F 1,80

Emplacement et nature de la section : Section balisée, amont échelle - fond sableux (croquis au verso)

Mode opératoire : Bateau + Cercle hydrographique - Point par point

Matériel utilisé : Moulinet : OTT C31 N° 19668 Hélice n° Plastique pas : 0,25

Support : Treuil Neyra - Saumon 25 kg Constante du saumon : 0,25

Début de la mesure en : R.G

Position du zéro : à la surface 1 top = 1 tour

Opérateur : MARIVOLANITRA

Observations : Compteur CJR22 T = 24,8 s soit V = 0,2485 n + 0006
On donne d'abord l'angle 2α puis 2β en colonne "distance" - BC = 66 m -

N°	Heure / Hauteur	Distance	Profondeurs : - mesurée / - corrigée	Positions du moulinet	Angle α	Angle β	Nombre de tops	Nombre de tours	Temps s	N/T	V m/s	Observations
1	8H	144°21	2,44	2,40			127		24,8		1,276	(1) V_1 B
	1,81m	37°11	2,59	1,94			154		"		1,546	(2) V_1 C
		65m(1)		1,25			180		"		1,806	(3) Position de V_1 par
		594m(2)		0,56			182		"		1,826	rapport à R.G
		30m(3)		0,10			174		"		1,746	
2		131°33	2,87	2,85			210		24,8		2,106	
		38°40	3,02	2,30			215		"		2,156	
		90 m		1,48			214		"		2,146	
		57 0m.		0,66			222		"		2,226	
		55m		0,10			218		"		2,186	
3		102°40	3,12	3,10			224		24,8		2,246	
		43°37	3,27	2,50			231		"		2,316	
		160m		1,60			234		"		2,346	
		501m.		0,70			248		"		2,486	
		125m		0,10			250		"		2,506	
		⋮	⋮	⋮			⋮		⋮		⋮	
16	11H50	36°52	1,63	1,60			175		24,8		1,756	
	1,80m	146°35'	1,78m	1,30			170		"		1,706	
		600m		0,85			184		"		1,846	
		60m.		0,40			190		"		1,906	
		565m		0,10			189		"		1,896	

R.D : 2α = 34°59' 2β = 165°45' → distance de B à RD : 635m.

- Fig 58 -

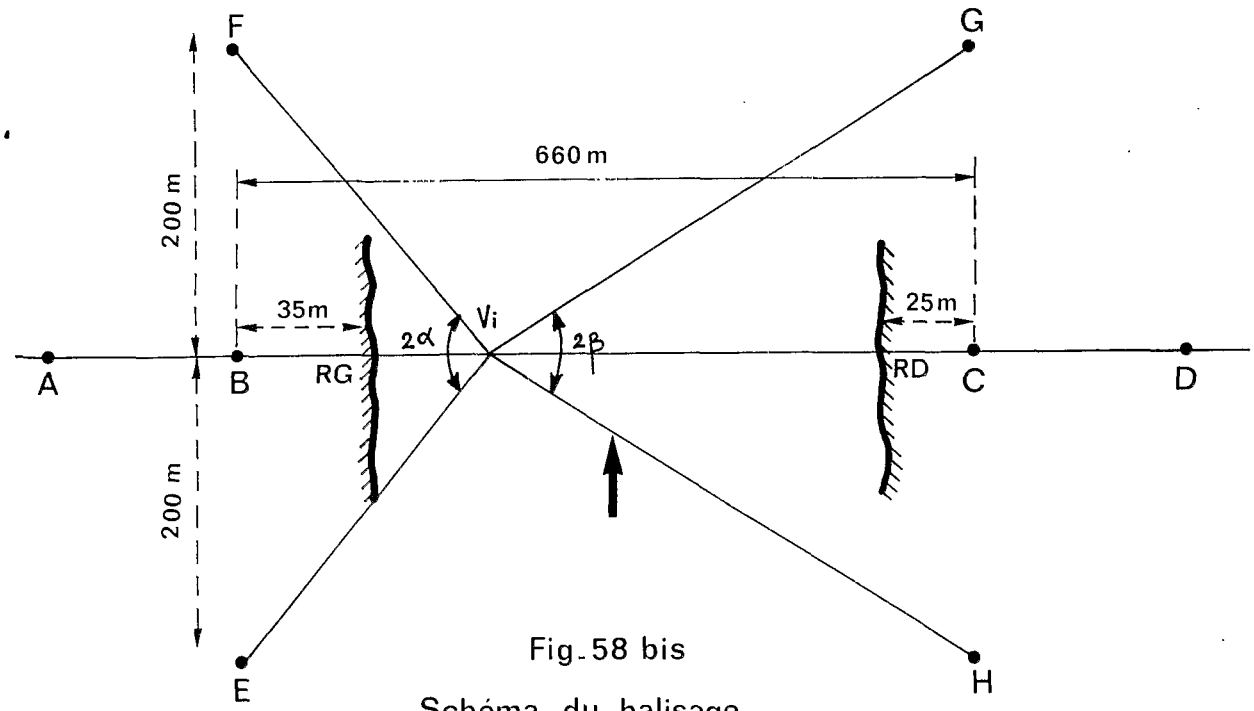


Fig. 58 bis

Schéma du balisage

III.3 2 7. Jaugeages à partir d'une station téléphérique

III.3 2 7 1. Préparation du matériel

- Avant de monter le moulinet et le saumon, vérifier la tension des câbles tracteurs (parallèles au câble porteur), le serrage des serre-câbles, la tension des haubans dans le cas de station avec pylône, le graissage des divers éléments du treuil et des poulies de renvoi et du chariot. Ne jamais graisser le frein automatique de la manivelle.

- Monter le moulinet, le saumon. Brancher le compteur. Faire les divers essais de fonctionnement, en particulier contact de fond.

- Mettre le compteur de distance à zéro lorsque le saumon est au-dessus du repère de départ.

III.3 2 7 2. Exécution de la mesure

- Repérer la positionde la rive en lisant le compteur de distance au moment où le saumon passe à la verticale de la rive,

- Se placer à la première verticale et opérer point par point comme avec le montage sur saumon à partir d'un pont,

- En cas de fortes vitesses, mesurer à chaque verticale la distance d en remontant le saumon jusqu'à la poulie de suspension (compteur à zéro) puis en amenant la semelle du détecteur de fond en contact avec la surface de l'eau (lire le compteur, puis le remettre à zéro). Faire ensuite descendre très rapidement le saumon sur 1 m ou 2 m environ (lorsque la distance d est grande), pour qu'il prenne une position d'équilibre en-dessous de la surface de l'eau.

Descendre alors jusqu'au fond et noter la longueur y lue sur le compteur de profondeur. Estimer l'angle de dérive α à l'aide d'un rapporteur à pendule.

Remonter en mesurant la vitesse en cinq points. Le dernier point se situera dans ce cas, à 20 cm au moins, de la surface.

Sortir le matériel de l'eau et se placer à la prochaine verticale. Répéter les mêmes opérations que précédemment.

- Pendant toute la mesure, surveiller les corps flottants et ne pas hésiter à remonter l'équipement de mesure si l'on a quelques doutes sur la direction de la trajectoire.

- Sur les rivières à fonds sableux, il est conseillé de laisser le saumon le moins longtemps possible au contact avec le lit. Pour cela, il est donc nécessaire de disposer d'un bon détecteur de fond. En cas de mauvais fonctionnement de ce détecteur, on peut mesurer la profondeur en repé rant le moment où le câble porteur est soulagé lorsque le saumon touche le fond, mais la précision est nettement moins bonne.

- Pendant la remonté du saumon, veiller à ce que le câble électroporteur s'enroule à spires jointives sur le tambour du treuil (certains treuils sont équipés d'un système permettant cet enroulement à spires jointives).

- Au cours de la manoeuvre de retour du chariot, le saumon a tendance à venir se bloquer près de la poulie de suspension du fait que le diamètre du touret du câble électroporteur augmente. Il faut de temps en temps faire descendre le saumon pendant la manoeuvre de retour.

- Sur les rivières dont la largeur dépasse 50 m, le réglage du moulinet à la surface et le repérage de la berge opposée sont facilités par l'emploi de jumelles.

- Les treuils doubles manuels fabriqués par OTT ne sont pas , pour l'instant, équipés d'un ralentisseur de descente. En cas de variation très rapide du plan d'eau, on peut, avec un certain entraînement, faire descendre le moulinet à vitesse relativement constante en tournant la manivelle à la main. Mais ceci ne constitue qu'un pis-aller.

- Les treuils doubles Neyrpic sont prévus pour recevoir un ralentisseur.

III.3 2 7 3. Tenue du carnet

- Sur la ligne "origine de la mesure" préciser la distance entre la rive et le repère fixe de départ.

- Le reste est identique au jaugeage point par point avec saumon à partir d'un pont. (Il est impossible de noter l'angle horizontal β avec le matériel classique).

III.3 2 7 4. Conseils et erreurs à éviter

- Dégager la berge côté treuil de la végétation pouvant gêner la visibilité vers l'amont de la rivière pour faciliter la surveillance des corps flottants,

- Un conseil valable pour toutes les méthodes : en cas de forte crue, attendre la période du maximum pour commencer les mesures : les corps flottants sont alors moins nombreux.

- Ne pas oublier de graisser la poulie de renvoi sur la berge opposée au treuil.

- Bien adapter la masse du saumon aux capacités de l'installation.

- Ne jamais graisser les poulies de mouflage et le tambour du câble tracteur ; cela provoque des glissements.

III.3 2 8. Jaugeages aux flotteurs

Quand l'utilisation du moulinet devient totalement impossible, on mesure la vitesse en surface à l'aide de flotteurs naturels ou artificiels.

Cette méthode de mesure peut donner de bons résultats si la technique est correctement appliquée. Ce procédé peut paraître sommaire, mais il est souvent préférable d'avoir une mesure aux flotteurs que pas de mesure du tout.

La méthode a été parfaitement décrite par G. JACCON et M. TOURNE dans une note : "Estimation du débit de crue par la mesure des vitesses de surface : jaugeages au flotteurs" - Note technique N° 57, Service Hydrologique, février 1975, dont nous tirons les passages suivants.

III.3 2 8 1. Choix du secteur de mesure

Il est recommandé, et presque indispensable, d'effectuer cette opération avant les crues. Mais il n'est pas nécessaire d'avoir un balisage préalable pour faire un jaugeage aux flotteurs lors d'une crue.

On choisit un tronçon de rivière ayant une longueur supérieure à deux fois la largeur du plan d'eau et présentant les caractéristiques suivantes :

- rectiligne avec rives parallèles,
- bien dégagé, bonne visibilité dans tous les sens,
- accès facile à une rive,
- pente du lit constante (pas de chute ou de zone de rapides entre les deux biefs),
- lit stable et rocheux si possible.

Ces conditions sont évidemment à respecter , le mieux possible, le tronçon idéal existant rarement.

III.3 2 8 2. Balisage

Il est effectué à l'étiage. Il comprend : 4 balises A B C D naturelles (arbres, rochers), ou artificelles (jalons, balises, poteaux...), réparties deux par deux sur chaque rive et matérialisant deux sections transversales AB et CD (voir croquis N° 59).

Il faut que :

- les sections transversales AB et CD soient rigoureusement parallèles,

- que les balises A et C (ou B et D) soient accessibles en crue, quel que soit le niveau de l'eau (balises placées au-dessus des plus hautes eaux),

- de A et C (ou B et D) on doit voir parfaitement les autres balises.

La distance entre les sections AB et CD est autant que possible supérieure à deux fois la largeur de la rivière.

On essaiera d'implanter AB et CD perpendiculairement à la direction du courant, et si possible AC (ou BD) parallèlement à cette direction pour simplifier les calculs.

Après implantation des balises, un lever topographique précis permettra de connaître L, AB, CD, ainsi que les distances des balises aux rives et les profils en travers de la rivière.

III.3 2 8 3. Mesure des vitesses

- Méthode des deux chronomètres à aiguilles rattrapantes :

C'est la méthode la plus complète et la plus sûre, mais aussi la plus difficile. Rappelons qu'un chronomètre à aiguille rattrapante est un chronomètre muni de deux aiguilles qui partent simultanément lors de la mise en marche, mais qui peuvent être arrêtées sépa-

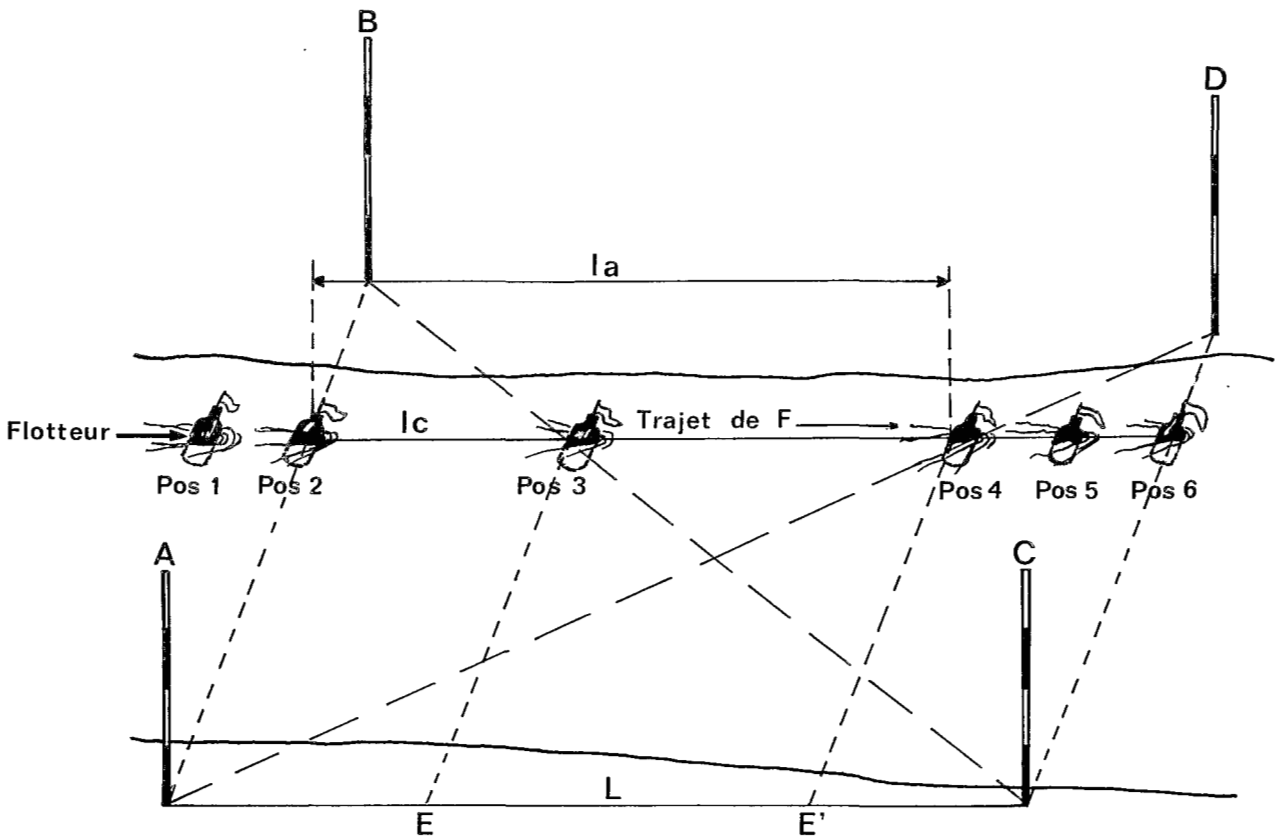


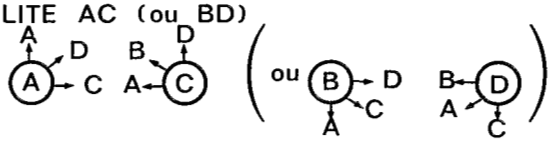
Fig.59

BALISAGE

CONSIGNES A RESPECTER IMPERATIVEMENT

1. PARALLELISME AB et CD

2. ACCESSIBILITE AC (ou BD)

3. VISIBILITE 

rément. Ce chronomètre mesure donc deux temps T_1 et T_2 avec une même origine T_o. La mesure sera réalisée par deux techniciens munis chacun d'un chronomètre et aidés par un observateur qui lancera les flotteurs artificiels ou signalera l'arrivée des flotteurs naturels (arbres, branchages, etc...).

La méthode de mesure est parfaitement décrite et illustrée par les croquis donnés dans le dépliant N° 59bis. Les temps mesurés sont portés sur des fiches tenues par chaque technicien (figure 60) ; chaque flotteur est numéroté, on utilise une ligne du tableau par flotteur. Si l'observateur C ne peut repérer le flotteur, un signe particulier (mouvement horizontal du bras par exemple) l'indiquera à son collègue. Dans ce cas, seul le temps T_o sera alors mesuré. Chaque technicien portera en face du numéro du flotteur la mention "flotteur perdu" en abrégé "FP", dans la colonne "observations".

L'utilisation de flotteurs naturels est délicate : en particulier, l'observateur C ne repère pas toujours facilement ce que A lui désigne. Une liaison radio ou téléphonique peut permettre une meilleure définition des flotteurs et diminuer les risques d'erreur.

A la fin de la mesure on dispose pour chaque flotteur de quatre temps :

t_a pour le parcours l_a

t_c pour le parcours l_c

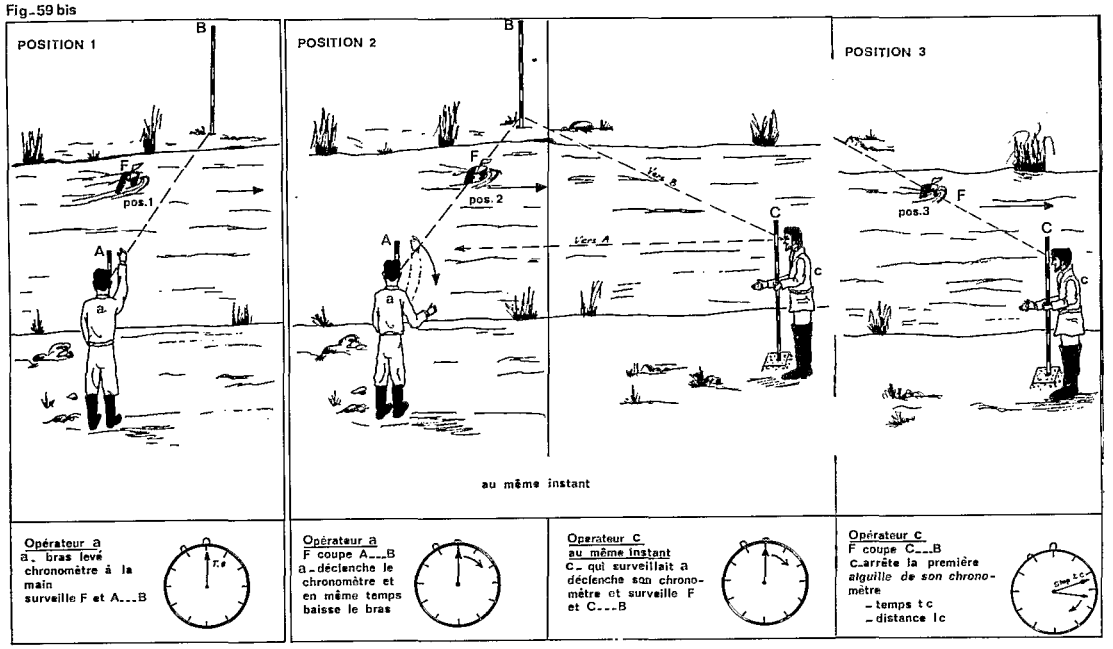
T_a et T_c pour le parcours L.

On constate immédiatement que $T_a = T_c$ aux erreurs de mesure près (réflexes des opérateurs). Les temps t_a et t_c seront utilisés lors du dépouillement pour le calcul de la distance du flotteur à la rive.

Pendant toute la durée du jaugeage, il est nécessaire de noter les variations du plan d'eau. Si les échelles limnimétriques sont situées dans le tronçon de mesure, les lectures seront faites à intervalles réguliers (toutes les 10 minutes ou tous les quarts d'heure).

Les cotes échelles et les profils en travers antérieur et postérieur à la crue, permettront de connaître la loi de variation dans le temps de la section mouillée.

Fig.-59 bis


POSITION 1
POSITION 2
POSITION 3
B
A
C
F
pos.1
pos. 2
pos.3
Vers B
Vers A
au même instant
Opérateur a
a - bras levé chronomètre à la main surveille F et A---B
Opérateur a
F coupe A---B
a - déclenche le chronomètre et en même temps baisse le bras
Opérateur c
au même instant
c - qui surveillait a déclenche son chronomètre et surveille F et C---B
Opérateur c
F coupe C---B
c - arrête la première aiguille de son chronomètre
- temps t c
- distance l c

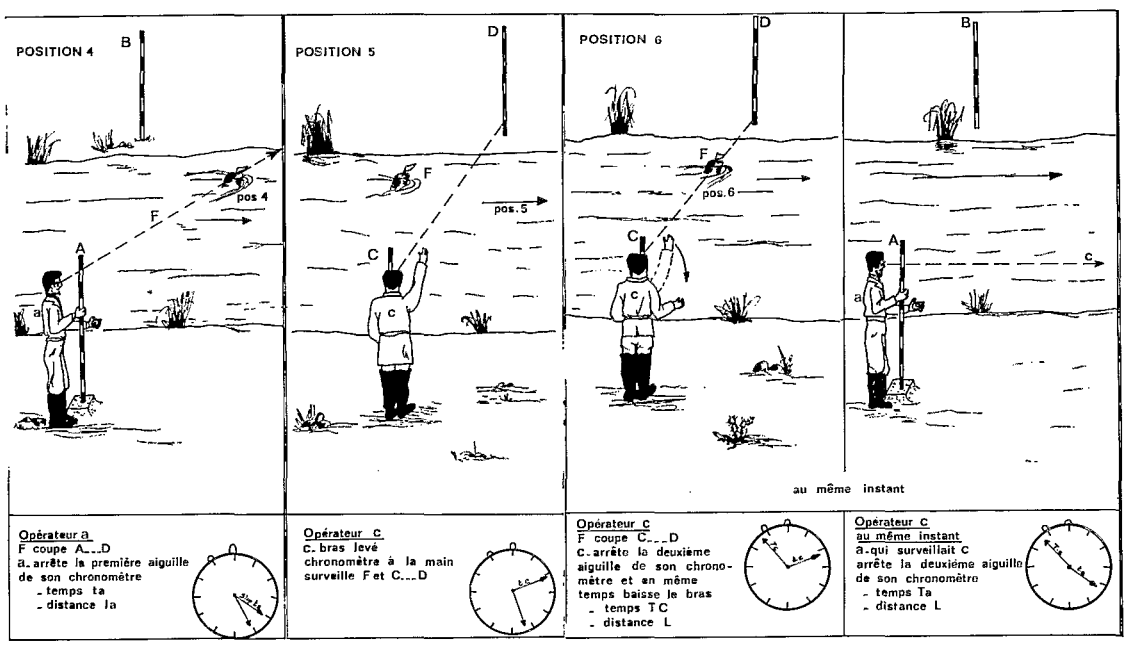

POSITION 4
POSITION 5
POSITION 6
B
D
A
C
F
pos 4
pos.5
pos.6
au même instant
Opérateur a
F coupe A---D
a - arrête la première aiguille de son chronomètre
- temps ta
- distance la
Opérateur c
c - bras levé chronomètre à la main surveille F et C---D
Opérateur c
F coupe C---D
c - arrête la deuxième aiguille de son chronomètre et en même temps baisse le bras
- temps TC
- distance L
Opérateur c
au même instant
a - qui surveillait c arrête la deuxième aiguille de son chronomètre
- temps Ta
- distance L

Fig. 60

JAUGEAGE AUX FLOTTEURS — FICHE DE TERRAIN

Rivière : Station : Date : Heure début : Cote :
Heure fin : Cote :

Emplacement : Méthode utilisée :

Opérateur amont(1) : Opérateur aval(1) :

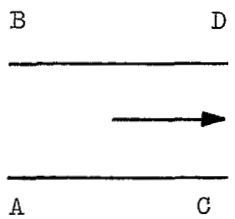
(1) rayer la mention inutile

SCHEMA BALISAGE

AB = m
CD = m
L = m
∝ = °

Levé topographique fait le : par :

Remarques



REPERAGE DU PLAN D'EAU Nature :

Heure :	Cote	Flotteur n°
"	"	"
"	"	"
"	"	"
"	"	"
"	"	"

Emplacement de la section transversale :

Remarques :

MESURES DES VITESSES Nombre de chronomètres :

N°	t	T	obs	N°	t	T	obs	N°	t	T	obs	N°	t	T	obs
1				11				21				31			
2				12				22				32			
3				13				23				33			
4				14				24				34			
5				15				25				35			
6				16				26				36			
7				17				27				37			
8				18				28				38			
9				19				29				39			
10				20				30				40			

Si les échelles ne sont pas dans le tronçon de mesure, il faut installer un repère près de A ou de C (ou mieux près des deux) qui seront nivelés par rapport aux échelles et lors du levé obligatoire du profil en travers de la section repère avant et après la crue. Si l'on utilise deux repères en AB et CD, la section mouillée retenue pour le calcul du débit sera la moyenne des deux sections repères. Il faut que les sections repères soient perpendiculaires au sens du courant.

- Méthode utilisant un chronomètre à aiguille rattrapante :

Seul l'opérateur C effectue les mesures, A donne l'instant de passage des flotteurs sur AB ; on a le temps T pour parcourir L et le temps t_c pour parcourir l_c, ce qui donne une seule estimation de la distance à la rive.

III.3 2 8 4. Remarques

Il est bien évident que cette méthode s'applique difficilement dans le cas de sections très mobiles, car il sera très difficile de savoir comment a varié la section pendant la crue et même avec des mesures de vitesses correctement réalisées, on aura une grande incertitude sur la valeur du débit.

Pour être valable, cette méthode nécessite une organisation minutieuse et un bon entraînement de l'équipe de jaugeurs. Bien que donnant des résultats satisfaisants lorsqu'elle est bien appliquée, il ne faut pas quand même oublier qu'un jaugeage complet au moulinet est toujours préférable à un jaugeage aux flotteurs.

III.3 2 8 5. Jaugeages de nuit aux flotteurs

Tous les hydrologues ont constaté que les crues les plus importantes se produisent le plus souvent la nuit. Il est donc prudent de prévoir, dans le cas par exemple d'études sur petit bassin représentatif, un équipement avec lequel il sera possible de faire des mesures aux flotteurs pendant la nuit.

Le matériel de base sera constitué par deux projecteurs orientables alimentés par un groupe électrogène ou des batteries. On utilisera des flotteurs artificiels et des balises recouverts de peinture phosphorescente.

Un aide lance les flotteurs à intervalles réguliers en amont de la section AB. L'opérateur situé en A oriente son projecteur sur un point situé un peu en amont de B : il prend le flotteur dans le faisceau lumineux. Lorsque le flotteur traverse la ligne AB, il éteint son phare et met en marche son chronomètre. A ce signal, l'opérateur situé en C déclenche son chronomètre et allume son projecteur. Il suit le flotteur avec le projecteur et arrête l'aiguille rattrapante lorsque le flotteur traverse la ligne BC. L'opérateur A arrête l'aiguille rattrapante et éteint sont projecteur. L'opérateur C suit le flotteur jusqu'à la traversée de CD. Il éteint son phare et arrête son chronomètre ; au même instant A arrête aussi son chronomètre. L'aide situé en amont lance un nouveau flotteur.

III.3 2 9. Jaugeages continus ou par verticales indépendantes

III.3 2 9 1. Matériel utilisé

Tout le matériel qui a été décrit au chapitre II pour les mesures à partir de ponts ou de trailles téléphériques est utilisé en fonction de la situation de la station hydrométrique, de ces caractéristiques et des conditions locales d'écoulement. Sur chaque verticale, la mesure peut se faire soit point par point, soit par intégration.

III.3 2 9 2. Mode opératoire

- Choix des verticales :

Dans un jaugeage par les méthodes classiques se déroulant dans des conditions normales, le choix des verticales de mesure est fait en fonction de la largeur du plan d'eau et des conditions d'écoulement, suivant des méthodes qui ont été examinées dans les paragraphes précédents.

Pendant les crues, les variations de plan d'eau peuvent être importantes et suivant la configuration topographique de la section, la largeur peut donc varier également dans de notables proportions. Le choix des verticales se fera donc en tenant compte de la section mouillée entre les plus basses et les plus hautes eaux (cette section mouillée sera tracée à partir d'un relevé topographique).

Le nombre de verticales sera déterminé pour la cote maximale atteinte par le plan d'eau et leur répartition dépendra de la forme du lit. En règle générale, on adoptera de 8 à 12 verticales.

Les verticales seront désignées par un symbole tel que V1, V2,... V12, qui leur sera définitivement affecté. Pour un pont à plusieurs piles, chaque travée sera considérée comme une section indépendante.

- Repérage des verticales :

Pont ou passerelle

Le repérage se fait à la peinture sur le pont. Il faut veiller à entretenir périodiquement les marques de façon à pouvoir les repérer facilement en toute circonstance.

Transporteur aérien

Il faut nécessairement choisir un point fixe origine, pour lequel le compteur des distance du treuil sera mis à zéro. On peut choisir comme origine fixe des abscisses, le seuil de la porte de l'abri du treuil ou une borne placée près de l'abri, à la verticale du câble porteur. En mettant le contact de fond du saumon au-

dessus de ce repère, on peut définir le "zéro" à quelques centimètres près.

Les deux rives ne doivent jamais être choisies comme origine des abscisses, leur position est, en effet, variable avec le niveau de l'eau.

Le point origine étant choisi, on procède à la répartition des verticales. Puis on trace le profil en travers de la section de jaugeage en indiquant clairement la position des verticales et la valeur des différentes abscisses par rapport à l'origine fixe, désignée sans ambigüité. Une photocopie de ce plan sera affichée en permanence dans la cabine du treuil.

Quand le niveau du plan d'eau baisse, un nombre de verticales de plus en plus grand se trouve hors de l'eau. Pour les petites crues, seules trois ou quatre verticales peuvent être utilisées. Dans ce cas, si la variation du plan d'eau est lente, on peut ajouter quelques verticales intermédiaires. Mais il faut impérativement utiliser les verticales indépendantes. En cas de variation rapide, on ne fera les mesures que sur les verticales prévues sur le croquis ou les marques du pont.

- Exécution des mesures :

A partir du pont, on se place à la verticale V1. Avec un téléphérique, il faut mettre à zéro le compteur de distance du treuil au passage du saumon au-dessus du repère fixe. On déplace ensuite le saumon jusqu'à la verticale V1, d'abscisse connue et affichée dans la cabine, après avoir lu au passage sur le compteur l'abscisse de la rive.

Opérations successives

1. Amener le saumon en V1,
2. Lire la cote à l'échelle et l'heure,
3. Faire les mesures de vitesse sur la verticale V1 (trois à cinq points ou par intégration si possible),
4. Lire la cote à l'échelle et l'heure,
5. Amener le saumon en V2,
6. Lire la cote à l'échelle et l'heure,
7. Faire les mesures de vitesse sur V2,
8. Lire la cote à l'échelle et l'heure,
9. Amener le saumon en V3..... etc...

N-1 Lire la cote à l'échelle et l'heure,
N Faire des mesures de vitesse sur V12 (dernière verticale),
N+1 Lire la cote à l'échelle et l'heure,
N+2 Amener le saumon à la verticale de la rive opposée et lire sur le compteur l'abscisse correspondante,
N+3 Ramener le saumon sur V12
N+4 Lire la cote à l'échelle et l'heure,
N+5 Faire les mesures de vitesse sur V12
N+6 Lire la cote à l'échelle et l'heure,
N+7 Ramener le saumon en V11,
N+8 Lire la cote à l'échelle et l'heure,
..... etc....

Après être revenu en V1, et avoir repéré l'abscisse de la rive (côté V1) on retourne vers V2, V3, V4... et ainsi de suite jusqu'à la fin de la crue. On peut également, lorsqu'on jauge à partir d'un pont, opérer toujours dans le même sens de V1 à V12, afin d'avoir pour chaque verticale des hauteurs à l'échelle mieux réparties. Ceci n'est pas possible avec une station téléphérique; en effet, le trajet retour (de V12 à V1) est long et pénible lorsqu'il est fait d'une seule traite. Il vaut donc mieux jauger également au retour (méthode ci-dessus).

III.3 2 9 3. Remarques

- Si les vitesses deviennent trop fortes, on essaie de mesurer uniquement la vitesse en surface,

- Si la cote se stabilise, on peut faire des verticales intermédiaires quand on le juge nécessaire.

- La mesure par verticales indépendantes ne sera arrêtée que lorsqu'il devient possible de faire avec une bonne précision (variation faible de la cote à l'échelle) un jaugeage complet par les méthodes classiques.

- Avec les transporteurs aériens, il faut veiller très attentivement à ce que le câble tracteur ne glisse pas sur le tambour. Ramener de temps en temps le saumon sur l'origine fixe et vérifier que le compteur indique toujours zéro.

- En très forte crue, ne pas chercher à faire des mesures trop près de la surface et aussi trop près du fond. Opérer avec précaution pendant toute la période de montée de la crue.

III.3 2 9 4. Avantages de la méthode

Une mesure complète par les méthodes classiques demande au minimum une heure de travail sur le terrain.... quand tout marche bien. Sur les rivières à crues rapides, la variation de plan d'eau, pendant une heure, atteint plusieurs dizaines de centimètres parfois même plus d'un mètre.

En opérant par verticales indépendantes, le temps de mesure sur chaque verticale est réduit à quelques minutes, d'où une variation très faible du plan d'eau. Nous verrons que les méthodes de dépouillement utilisées permettent un tracé très précis des courbes de tarage.

En résumé,

Cette méthode doit être appliquée sur toutes les rivières à crues rapides dont le fond du lit est parfaitement stable. Or, cela ne se rencontre que très rarement sur les cours d'eau naturels. C'est une méthode idéale pour les petits bassins versants à section aménagée en béton. Elle nécessite de la part des équipes d'hydrométristes qui la pratiquent, un certain sens de la discipline et de l'organisation . Il faut, en effet, se souvenir qu'une crue doit être jaugée depuis le début jusqu'à la fin, et cela peut demander de quelques heures à plusieurs jours. Il convient d'être très prudents pendant les opérations de nuit et durant la phase de montée du plan d'eau (charriage important en surface).

IV. TRAVAUX DE BUREAU

IV. 1. REMARQUES PRÉLIMINAIRES

Les opérations effectuées sur le terrain aboutissent à la connaissance de la vitesse du courant en divers points d'une section en travers de la rivière dont on veut connaître le débit. Comme nous l'avons vu, ces opérations sont souvent délicates et exigent beaucoup de soin et de méthode. La précision du résultat final, dépend en effet de la précision avec laquelle sont mesurées les différentes grandeurs intervenant dans le calcul.

Si Ω est l'aire de la section de jaugeage rapportée au plan x o y, et v la vitesse supposée constante à travers un élément $d\Omega$ le débit est donné par la double intégration :

$$Q = \int_{\Omega} v \, d\Omega = \iint_{\Omega} v \, dx \, dy = \int_{o}^{x} dx \int_{o}^{y} v \, dy$$

La première intégration donnera le débit élémentaire ou débit par unité de largeur (appelé parfois p.u), le long d'une verticale de mesure :

$$dq = \int_{o}^{y} v \, dy$$

Ce débit élémentaire est généralement exprimé en m2/s. Le débit total Q sera obtenu par la sommation de ce débit élémentaire suivant l'horizontale.

Différentes méthodes que nous examinerons dans les paragraphes suivants ont été proposées. Ces méthodes manuelles, donnent des résultats corrects à condition d'être appliquées avec soin, et elles ne sont point trop fastidieuses si les dépouillements sont fait immédiatement après chaque retour de tournée.

Il faut éviter d'accumuler les mesures de débits non dépouillées car la reprise d'un grand nombre de mesures anciennes est un travail pénible et les souvenirs sont confus.

Avec l'apparition des ordinateurs, un certain nombre de services hydrologiques ont pensé résorber le retard pris dans l'exploitation des jaugeages, en utilisant la machine, puis l'habitude étant prise, tous les jaugeages ont été systématiquement calculés de cette manière.

Nous estimons que cette façon de procéder n'est pas recommandable pour diverses raisons.

- Avec ce mode de traitement, l'opérateur de terrain n'arrive pas lui-même au but final qui est le calcul et la connnaissance du débit. Les renseignements qu'il a recueillis, souvent à grand peine, sont acheminés vers l'ordinateur par des personnes qui ignorent en général les difficultés rencontrées pour obtenir cette information. Nous pensons que le fait de dépouiller manuellement un jaugeage peut contribuer à développer le sens de la mesure et à éviter certaines erreurs qui, dans le cas d'un dépouillement automatique continueront à exister, la machine ne faisant aucune remarque.

Ajoutons que la préparation des données pour le passage au calculateur nécessite un temps presque aussi long que le dépouillement lui-même (en particulier avec la méthode arithmétique, le temps nécessaire pour arriver au résultat est égal à celui qu'il faut pour perforer les cartes de données). La précision est dans tous les cas sensiblement la même.

- La deuxième remarque est la suivante : avec le développement rapide des calculatrices électroniques de poche, on peut, à la limite, dépouiller le jaugeage au fur et à mesure de sa réalisation sur le terrain. Avec les calculatrices portatives programmables, on peut, à l'aide de programmes très simples, obtenir le résultat quelques secondes après l'introduction des données. La précision est sensiblement la même que celle donnée par les autres méthodes.

Actuellement, ce matériel se trouve sur le marché pour un prix très modique. Il est également possible de brancher la calculatrice sur une imprimante. Compte tenu du coût d'un équipement complet, de mesure des vitesses, il serait souhaitable d'y inclure une calculatrice de ce type. L'hydrométriste disposerait ainsi d'un outil qui rendrait son travail plus agréable en lui permettant d'arriver plus rapidement au résultat sans passer par les calculs et planimétrages longs et quelquefois fastidieux.

- Enfin, les calculs intermédiaires qui permettent d'obtenir la valeur du débit ne constituent pas une information dont on a besoin dans la suite de l'interprétation hydrologique. Donc, sa mise sur cartes perforées ou autre support ne présente aucun intérêt. Il suffit d'archiver les originaux des feuilles de jaugeage et conserver une trace du dépouillement pour vérification lors d'une contestation éventuelle.

La seule information qui doit être stockée sur cartes perforées ou bandes magnétiques est constituée par les couples (H,Q) obtenus à partir des courbes de tarage des stations hydrométriques.

IV. 2. PRÉPARATION DES FEUILLES DE JAUGEAGE

Lorsqu'un jaugeage est terminé, on se trouve en présence d'un certain nombre de valeurs : nombre de tours, temps, relevés en différents points de mesure repérés en abscisses (distances horizontales, donnant la position des verticales) et en ordonnées (profondeurs).

Les vitesses du courant sont obtenues, soit directement à partir de la formule du moulinet en calculant le nombre de tours par seconde, soit à l'aide de barêmes.

Le débit sera calculé, soit graphiquement par double intégration par la méthode des profils de vitesse ou des paraboles, soit arithmétiquement (méthode de la section médiane ou méthode de la section moyenne). Les méthodes arithmétiques sont beaucoup plus rapides et sont particulièrement utiles pour les évaluations effectuées sur le terrain. Les méthodes graphiques exigent un travail plus astreignant, mais permettent parfois d'avoir une idée plus claire des caractéristiques de l'écoulement dans la rivière. La précision des résultats obtenus avec les deux méthodes est à peu de chose près, la même.

IV. 2. 1. CALCUL DES VITESSES A PARTIR DES RELEVÉS

Nous avons vu que la formule générale d'étalonnage d'un moulinet est une équation de la forme : $V = an + b$

dans laquelle : V = vitesse du courant en m/s,

n = vitesse de rotation de l'hélice en tours/seconde,

a = constante ou pas réel de l'hélice,

b = constante due aux frottements et dont la valeur est très voisine de la vitesse de démarrage du moulinet.

Sur le terrain, on mesure en général un nombre de tours N pendant un temps T.

Le premier travail à effectuer au bureau sera donc de calculer à partir des valeurs de N et T obtenues sur le terrain la vitesse du courant en m/s en chaque point.

Pour le calcul de V, nous distinguerons deux cas :

a) les opérateurs ne disposent que d'une règle à calcul ou d'une machine à calculer simple électromécanique, ou électronique quatre opérations. On procèdera soit :

- au calcul coup par coup en faisant pour chaque point le rapport N/T et en portant cette valeur dans la formule du moulinet. Veiller, dans le cas de moulinet ayant plusieurs formules de tarage, à utiliser la formule correspondant bien à la valeur de n = N/T,

- en établissant un barême pour le moulinet utilisé donnant la vitesse en m/s en fonction de n (barême V(n)), ou du nombre de tours réalisés dans le temps T fixe de 30, 50 ou 100 secondes (barême V(N)),ou du temps T mis pour faire un nombre de tours N fixe égal à 50, 100 ou 200 (barême V(T)).

Le choix du barême (V(n), V(N) ou V(T)) dépend évidemment du matériel de comptage dont on dispose. Avec un compteur à présélection, on peut choisir le barême V(N) si l'on présélectionne le nombre de tours N. Ces barêmes sont établis une fois pour toutes dès réception du matériel pour toute la gamme de vitesses et en tenant compte éventuellement des diverses formules de tarage du moulinet. Les barêmes seront donnés avec trois chiffres significatifs après la virgule.

Les barêmes V(N) ou V(T) évitent d'avoir à calculer le rapport N/T d'où une certaine simplification.

b) Les opérateurs disposent de calculatrices électroniques programmables.

Les constantes du moulinet sont introduites en mémoire dans la machine ainsi que la valeur de n = N/T, limite entre deux équations. Un programme simple permet ensuite de calculer V m/s en introduisant successivement les valeurs de N et T obtenues en chaque point de mesure. Un test est prévu dans le programme pour déterminer en fonction de la valeur de n l'équation qui doit être utilisée pour le calcul de V. Cette méthode est beaucoup plus rapide que la précédente.

Rappelons qu'avec les compteurs à présélection il est possible d'obtenirdirectement la vitesse du courant en m/s en affichant un temps T = 100 a. Si N est le nombre de tours mesuré pendant ce temps, la vitesse sera égale à :

$$V = a \times \frac{N}{100\ a} + b = \frac{N}{100} + b$$

Un calcul mental rapide permet de trouver directement V en divisant le nombre de tours par 100 en ajoutant au résultat ainsi obtenu la constante b. Si T = 100 a est inférieur à 30 secondes (hélices au pas de 0,10 par exemple), prendre T = 200 a ou T = 500 a.

IV. 2. 2. CORRECTIONS A APPORTER AU DÉPOUILLEMENT

Avant de commencer le dépouillement, il faut procéder aux corrections qui sont nécessitées du fait des caractéristiques de la section de mesures, de l'écoulement dans cette section ou de la fixation de l'appareillage.

IV.2 2 1. Profondeur de la rivière

Ces corrections n'interviennent que dans le cas d'utilisation de moulinet monté sur saumon. Avec un montage sur perche, la profondeur est obtenue directement au point d'affleurement de la surface du plan d'eau avec la perche ou par lecture sur un vernier (cas des perches coulissantes). Avec un montage sur saumon, deux cas peuvent se présenter.

IV.2 2 1 1. Vitesses faibles, pas de dérive du saumon

L'indication du compteur donne la profondeur entre la surface et la position du moulinet au moment où le contact de fond se ferme. La profondeur réelle est égale au nombre lu sur le compteur augmenté de la constante du saumon. Cette addition peut se faire directement sur le terrain (le préciser sur le carnet), sinon il faut la faire au bureau avant de commencer le dépouillement (indiquer sur la feuille de jaugeage dans la colonne "profondeur" la lecture du compteur : profondeur mesurée et au-dessous la profondeur corrigée.

IV.2_2_1_2. Fortes_vitesses,_dérive_importante_du_saumon

Dans ce cas, lorsque le moulinet est immergé, le câble électroporteur n'est pas vertical et l'angle qu'il fait avec la verticale est d'autant plus grand que la vitesse est plus forte (voir III.2 7 2). Cette correction n'intervient que si l'angle est supérieur à 10°.

Sur le terrain, on note dans la colonne "angle câble" de la feuille de jaugeage, l'angle maximal lorsque le saumon est au fond (en toute rigueur il faudrait noter l'angle en chaque point de mesure mais les variations sont généralement peu importantes, de plus les conditions difficiles de la mesure parfortes vitesses ne permettent pas toujours de multiplier les observations).

La correction effectuée au bureau est menée de la façon suivante : on calcule $p = y - x - u$, x étant la correction du câble exondé, u la correction du câble immergé, tirés des tableaux.

On porte dans la colonne "profondeur" la valeur de p au-dessous de la valeur y lue sur le compteur. On ajoute à p la constante du saumon. Cette valeur est inscrite en-dessous de p.

Les points intermédiaires sont répartis à partir de la valeur de p ; l'erreur commise est en général très faible et de toute façon moins importante que celle qu'on obtiendrait en mesurant l'angle en chaque point.

IV.2 2 2. Largeur de la rivière

Si on effectue un jaugeage à partir d'un pont non perpendiculaire à l'axe du courant, ou si la section définie par un câble fait, malgré les précautions prises, un certain angle avec la direction du courant, il faut apporter une correction en multipliant la largeur mesurée sur le pont ou sur le câble par le cosinus de l'angle formé par l'axe du pont (ou le câble) avec la perpendiculaire à la direction du courant.

Cette correction peut intervenir au stade final du dépouillement. Le débit réel étant égal au produit du débit obtenu à partir de la section définie par le pont ou le câble par le cosinus de l'angle.

IV.2 2 3. Correction de la vitesse

Il peut arriver que sur certaines verticales, la direction du courant ne soit pas perpendiculaire à la section. Lorsqu'on a la possibilité d'apprécier cet angle β (jaugeage à la perche au bateau ou à partir d'un pont), il faut noter la valeur et corriger la vitesse en multipliant la valeur mesurée par le cosinus de cet angle.

Rappelons que cette correction peut être évitée avec un montage sur perche en utilisant une hélice auto-composante placée perpendiculairement à la section. Avec un saumon, l'hélice auto-composante est sans intérêt, le saumon se plaçant toujours parallèlement à la direction de l'écoulement.

IV. 3. DÉPOUILLEMENT DU JAUGEAGE PAR LA MÉTHODE POINT PAR POINT

Nous disposons maintenant de feuilles de jaugeage sur lesquelles sont portées la largeur du plan d'eau, la profondeur de la rivière au droit de chaque verticale dont la position est connue en abscisses et la vitesse du courant en différents points de ces verticales.

Le calcul du débit se fera par double intégration graphique ou par intégration arithmétique.

IV. 3. 1. MÉTHODE GRAPHIQUE

Il existe deux méthodes : la méthode des paraboles (ou des paraboles de vitesse) et la méthode des isodromes (ou isotaches, courbes d'égale vitesse).

Signalons aussi la méthode graphique de HARLACHER qui permet le calcul du débit à partir des vitesses moyennes obtenues par planimétrage des paraboles (surface divisée par la profondeur). La courbe des débits élémentaires est ensuite construite graphiquement sur une épure représentant la section de mesure. Nous n'examinerons ici en détail que la méthode des paraboles qui est la plus utilisée.

IV.3 1 1. Règles générales

On dessine pour chaque verticale, la courbe des vitesses en fonction de la profondeur. Pour cela, tracer un trait horizontal représentant la surface de l'eau et un trait perpendiculaire dirigé vers le bas qui servira d'origine aux vecteurs vitesses et sur lequel sera portée la profondeur de la verticale. Attention à l'origine des profondeurs : avec une perche, l'origine est généralement au fond, avec un saumon elle est le plus souvent à la surface (le compteur du treuil additionne en descendant). Choisir une échelle de réduction pour porter les vitesses et une autre pour porter les profondeurs de telle façon que la figure obtenue ait une surface d'au moins 25 cm2. Cette figure doit se rapprocher le plus possible d'un carré, les profils de vitesse étroits et allongés suivant l'axe des vitesses ou celui des profondeurs sont à éviter.

Repérer le fond et les points de mesure sur l'axe des profondeurs. Tracer à l'échelle choisie, les vecteurs vitesses en chaque point avec le maximum de précision. Joindre les extrémités de tous les vecteurs vitesses par une courbe continue sans points anguleux en tenant compte des observations suivantes :

- la valeur de la vitesse sur le fond de la rivière dépend de la nature du lit comme le montre la figure 61. En général, la courbe des vitesses aboutira au fond perpendiculairement à l'axe des profondeurs, sauf cas particuliers d'un fond très rugueux ou d'une verticale située dans un trou ou à l'aval d'un rocher. En dehors de ces cas, on prendra V_F = 0,5 à 0,7 V_1, V_1 étant la vitesse mesurée au premier point au-dessus du fond.

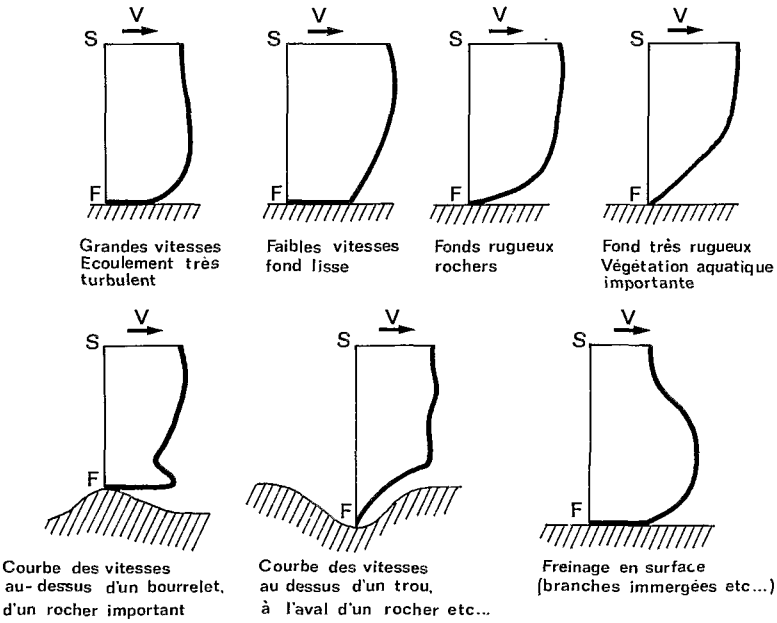


Fig_61 QUELQUES EXEMPLES DE "DE PARABOLES DE VITESSES"

Le code d'essai de la Société Hydrotechnique de France admet que la vitesse V_x en un point situé à une distance x du fond, peut s'exprimer par la relation :

$$V_x = V_a \left(\frac{x}{a}\right)^{1/n}$$

V_a étant la vitesse mesurée à la distance a du fond, n un coefficient fonction de la rugosité du fond (béton lissé 10, terre 5).

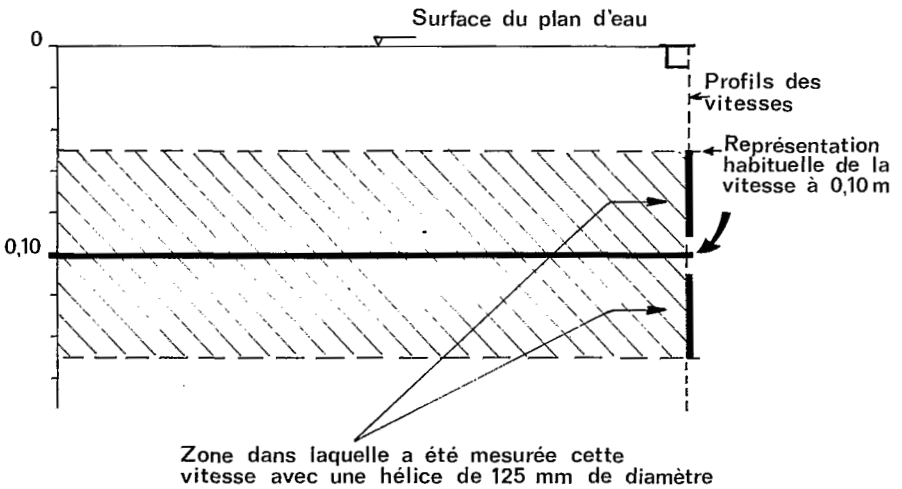
Dans le cas de jaugeages en rivière, l'utilisation de cette formule n'apportera qu'une précision illusoire et il sera plus simple de procéder comme il est indiqué ci-dessus.

- On essaiera, en surface, de faire arriver la courbe des vitesses perpendiculairement à la droite représentant la surface du plan d'eau, ceci revient à dire que la vitesse en surface est égale à la vitesse mesurée à 0,10 m.

Si l'on considère que le moulinet ne mesure pas une vitesse ponctuelle, mais la vitesse moyenne dans la surface balayée par l'hélice (un cercle de diamètre 100 ou 125 mm avec les moulinets ordinaires),

le vecteur vitesse en tous points ne devrait pas être représenté par une droite mais par un rectangle (figure 62).

Fig_62


Surface du plan d'eau
0
Profils des vitesses
Représentation habituelle de la vitesse à 0,10 m
0,10
Zone dans laquelle a été mesurée cette vitesse avec une hélice de 125 mm de diamètre

IV.3 1 2. Précautions à prendre pour le tracé des profils de vitesse

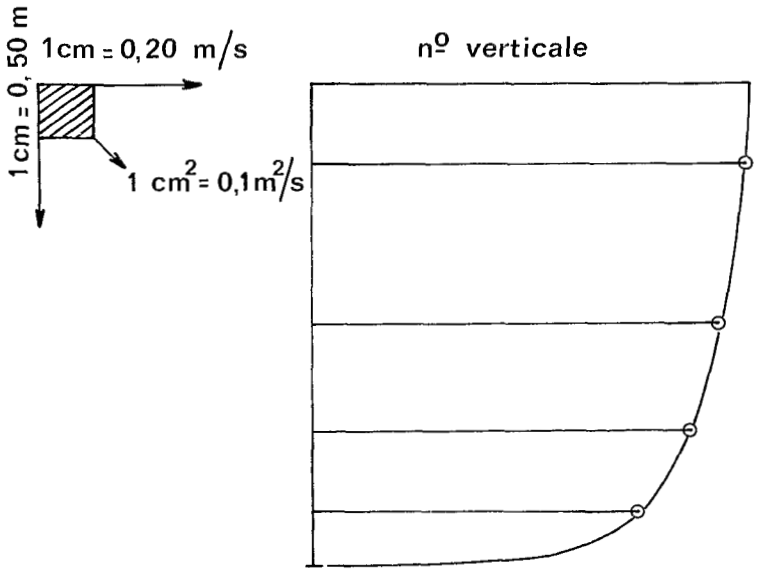
- Choisir les échelles pour les vitesses et les profondeurs permettant d'obtenir des figures ayant au moins 5 cm x 5 cm. Eviter les figures trop petites ou trop grandes car elles entraînent des difficultés au planimétrage et n'améliorent pas la précision. Les échelles choisies seront de la forme :

10^n, $1/2\ 10^n$, ou $1/5\ 10^n$ avec n négatif (par exemple: 1 cm = 1 m, 1 cm = 2 m, 1 cm = 10 m, etc... pour les largeurs ; 1 cm = 20 cm 1 cm = 50 cm, 1 cm = 1 m pour les profondeurs).

Il ne faut jamais adopter les échelles de type $1/3\ 10^n$ ou $1/4\ 10^n$ qui compliquent le report des points et la lecture des graphiques.

- Bien préciser pour chaque profil la valeur des échelles choisies, de façon claire, afin d'éviter les erreurs (figure 63) et le numéro des verticales.

Fig.63



On peut évidemment changer d'échelle pour la représentation des profils d'un même jaugeage si les vitesses dans la section varient dans de grandes proportions afin de donner à toutes les figures des dimensions correctes. Il faut noter avec soin les changements d'échelle.

- Bien repérer la position du zéro pendant le jaugeage afin d'éviter l'inversion des paraboles(origine au fond ou à la surface).

IV.3 1 3. Planimétrage des paraboles

Les paraboles étant tracées sur du papier calque ou du papier millimétré, le débit élémentaire sur chaque verticale sera obtenu par planimétrage.

On commence par contrôler le planimètre en mesurant la surface d'un carré de 10 x 10 cm sur le papier utilisé. L'opération est répétée deux fois. La valeur de la surface ainsi trouvée donne le coefficient correctif à adopter pour la suite du travail. Si l'erreur est inférieure à 1 % on ne fait pas de correction.

Ensuite, chaque parabole est planimétrée deux fois ; en cas de résultats différents de plus de 2 % , faire une troisième mesure. On adopte, comme valeur de la surface, la moyenne des valeurs qui présentent entre elles un écart inférieur à 2 %.

La feuille sera placée sous un calque débordant très largement la surface à mesurer, de façon que la roulette du planimètre se déplace toujours sur le calque.

La surface du profil est obtenue en cm2 et 1/10. Le débit élémentaire exprimé en m2/s. Si le coefficient correctif est nul, on calcule ce débit en multipliant cette surface (en cm2) par la valeur du cm2 sur le dessin, compte tenu de l'échelle utilisée (cas de la figure = 1 cm2 = 0,1 m/s).

Si le coefficient n'est pas nul, on opère de la façon suivante :

Soit S la surface de la parabole obtenue par planimétrage et P la surface du carré de 10 cm x 10 cm dont chaque côté vaut, en fonction des échelles choisies, a mètres pour les profondeurs et b m/s pour les vitesses.

Le débit élémentaire sur la verticale sera égal à :

$$q = S \times \frac{a\ b}{P} \quad m2/s$$

Ex :
avec les échelles suivantes : 1 cm = 0,5 m et 1 cm = 0,2 m/s,

on a trouvé : P = 103,5 cm2 et S = 62 cm2. On a :

$$q = 62 \times \frac{5 \times 2}{103,5} = 5,99 \text{ m2/s}$$

IV.3 1 4. Calcul du débit

La section mouillée est tracée sur du papier calque ou millimétré à une échelle convenable (rectangle de 20 à 25 cm par 10 à 12 cm). Les verticales sont positionnées sur la largeur et numérotées. Les échelles utilisées sont clairement indiquées.

On porte sur chaque verticale, à l'échelle choisie, les débits élémentaires en m2/s. On joint chaque point par une courbe continue. La jonction avec les berges se fait en tenant compte des conditions locales d'écoulement et de la forme du chenal au voisinage des rives (figure 64).

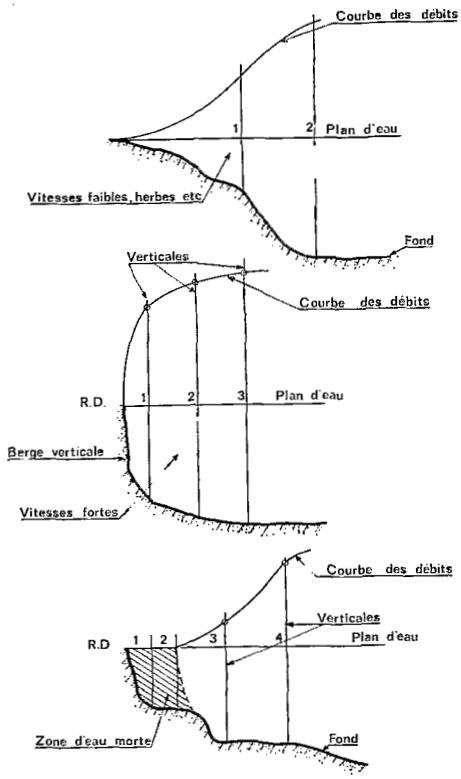


Fig. 64

Le débit est obtenu en mesurant avec les mêmes précautions que ci-dessus, la surface comprise entre le plan d'eau et la courbe des débits élémentaires, en tenant compte des échelles utilisées. Cette valeur est portée en-tête de la feuille de dépouillement avec la date et la cote à l'échelle.

La figure 65 montre un exemple de présentation du dépouillement. Les courbes d'égalès vitesses ne sont tracées qu'à titre indicatif.

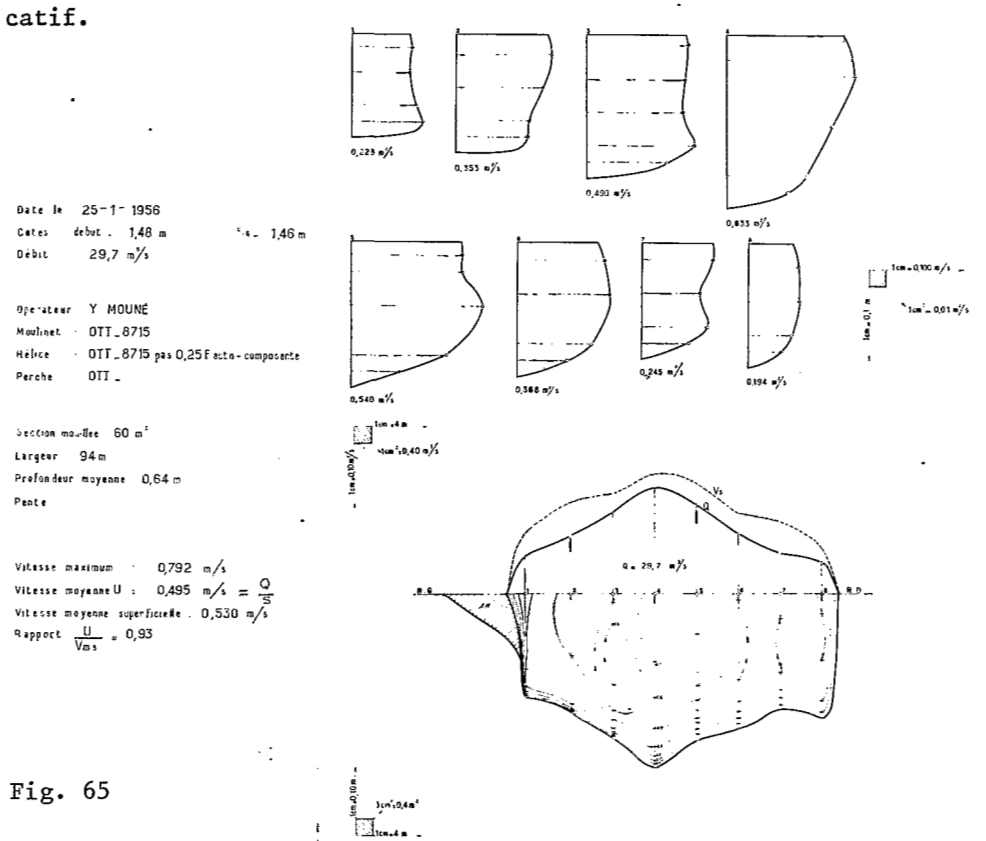


Fig. 65

Il reste le problème de la cote à adopter pour un jaugeage de crue lorsque celle-ci a sensiblement varié au cours de la mesure.

Personnellement, nous préférons, dans ce cas, représenter le couple Q(H) sur la courbe de tarage par un segment de droite parallèle à l'axe des hauteurs ayant pour origine la cote minimale et pour extrémité la cote maximale observées pendant toute la durée de la mesure (voir figure 2 § I.1 2).

Certains hydrologues préfèrent lier le débit à la cote moyenne. Si les variations sont faibles et toujours dans le même sens, on peut prendre la cote moyenne entre le début et la fin de mesure.

Si les variations de cotes sont amples et irrégulières, une première méthode consiste à tracer la courbe H à l'échelle en fonction du temps, et à déterminer ainsi la cote moyenne.

H. CORMARY et B. BILLON ont utilisé la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum_{o}^{n} (H_i \, Pu_i)}{\sum_{o}^{n} Pu_i}$$

H_i étant la cote à l'échelle au moment de la mesure à la verticale de rang i et Pu_i le débit élémentaire à cette même verticale. Nous donnons en annexe un exemple fictif de calcul de cote moyenne.

L'avantage de cette méthode est d'attribuer à une cote un poids d'autant plus important que le débit mesuré à ce moment-là est plus grand.

IV.3 1 5. Calculs complémentaires

La feuille de dépouillement comportera un certain nombre de renseignements qui seront utilisés pour les comparaison ou les extrapolations. Ce sont :

- le profil en travers,
- la section mouillée S en m2 obtenue par planimétrage,
- la largeur de la section L en m,
- la profondeur moyenne P_m = S/L en m (pratiquement égale au rayon hydraulique pour une rivière),
- la vitesse maximale V_{max} en m/s,

- la vitesse moyenne U = Q/S
- la vitesse moyenne de surface (V_{ms}), calculée en planimétrant l'aire de la courbe des vitesses de surface (V_s) relevées sur les paraboles et en divisant par la largeur,
- le rapport U/V_{ms} utile pour les jaugeages aux flotteurs si la cote du plan d'eau varie pendant la mesure.

IV. 3. 2. MÉTHODES ARITHMÉTIQUES

Ces méthodes présentent un intérêt évident si l'on dispose d'une calculatrice électronique programmable.

IV.3 2 1. Principe de la méthode

On utilisera la méthode de calcul dite "méthode de la section médiane". La section de mesure est constituée par un certain nombre de surfaces élémentaires limitées chacune par deux droites passant au milieu de deux verticales de mesure.

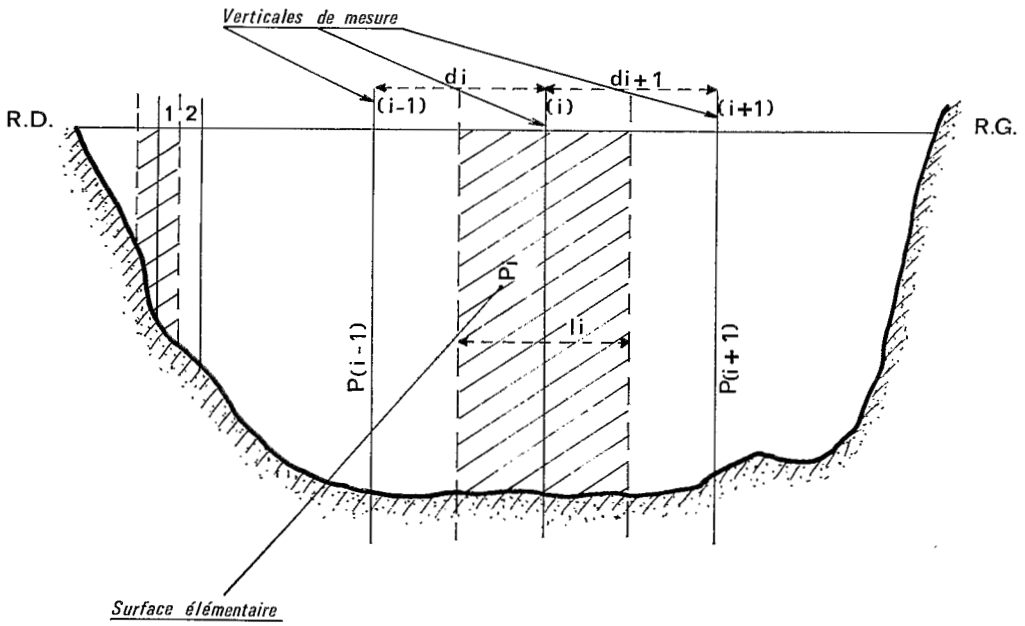
Si V_i est la vitesse moyenne sur la verticale i dont la profondeur totale est P_i (figure 66). Si d_i est la distance horizontale séparant la verticale V_{i-1} de la verticale V_i et d_{i+1}, la distance horizontale entre V_i et V_{i+1}, la surface élémentaire intéressée par V_i aura pour largeur :

$$\ell_i = \frac{d_i + d_{i+1}}{2}$$

et en admettant une variation linéaire de P_i V_i, le débit dans chaque élément de section sera calculé par la relation :

$$q_i = P_i \, V_i \, . \, \ell_i$$

Fig-66



Près des rives, les vitesses étant généralement très faibles, on peut admettre que le produit $P_i\ V_i$ est nul. L'erreur ainsi commise, est d'autant plus négligeable que la verticale V_1 est située plus près du bord. Dans le cas de berge verticale avec vitesses fortes jusqu'au bord, la distance ℓ_i sera prise égale à la distance d_1 entre la rive droite et la verticale V_1 augmentée de la demi-distance entre V_1 et V_2.

Rappelons qu'il existe une autre méthode dite de la section moyenne qui admet que la section de mesure est limitée par deux verticales adjacentes. Le débit sera calculé en utilisant les notations de la figure 66 par :

$$q_i = \frac{V_{i-1} + V_i}{2} \quad \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \quad d_i$$

La méthode de la section médiane est d'une utilisation plus facile avec une calculatrice programmable, car elle nécessite un nombre moins important de mémoires adressables.

IV.3 2 2. *Mode opératoire*

IV.3 2 2 1. Préparation des feuilles de jaugeage

- Corriger les profondeurs éventuellement et calculer les profondeurs totales (jaugeages au saumon),

- Calculer pour chaque élément de surface les largeurs ℓ_i.

IV.3 2 2 2. Calcul du débit

Nous nous placerons dans le cas le plus complexe où ont été notés sur le terrain le nombre de tours N et le temps T en chaque point de mesure. Si on obtient directement N (compteur CJR 100) ou la vitesse en m/s (compteurs à présélection) le programme de calcul en sera simplifié. On dispose d'une calculatrice programmable ayant une capacité suffisante pouvant être couplée à une imprimante.

On écrira un programme qui calcule les vitesses en chaque point, puis la vitesse moyenne V_i sur la verticale et enfin le débit élémentaire $Q_i = P_i \cdot V_i \cdot \ell_i$

Ces débits élémentaires sont sommés en mémoire de façon à donner le débit total Q.

Pour cela, stocker en mémoire les constantes du moulinet (a et b s'il n'y a qu'une formule de tarage, a_1, b_1, a_2, b_2 et n, nombre de tours par seconde correspondant au changement de formule s'il y a deux formules). Faire un test de comparaison entre N/T et n pour définir à partir de quelle équation on doit calculer la vitesse. Introduire les cinq couples de valeurs de N et T mesurés sur une verticale. Calculer les différentes valeurs de V et faire la moyenne à l'aide de la formule :

$$V_i = \frac{V_S + 2\,V_{0,2} + 2\,V_{0,5} + 2\,V_{0,8} + V_F}{8}$$

Dans le cas où il n'est pas possible de faire cinq points sur la verticale, la vitesses moyenne V_i sera prise égale à la moyenne arithmétique des vitesses mesurées sur la verticale.

Introduire P_i et ℓ_i et calculer $q_i = V_i \cdot P_i \cdot \ell_i$ et stocker ce résultat en mémoire pour sommations successives. Continuer ainsi avec toutes les verticales. Le calcul d'un jaugeage suivant cette méthode à l'aide d'une machine disposant de 200 pas de programme, nécessite au maximum une dizaine de minutes, ce temps étant d'ailleurs en totalité utilisé pour l'introduction des données, les calculs étant pratiquement instantanés. Du point de vue précision, les essais que nous avons faits, ont montré que les résultats sont très voisins (moins de 2 % près) de ceux obtenus par la méthode graphique.

Si l'on dispose de calculatrices plus petites, avec un nombre de pas de programmes faible, il est possible de scinder le programme en deux parties : d'abord calcul des vitesses moyennes, puis calcul des q_i et sommation pour obtenir Q.

Pour des résultats comparables, cette méthode nécessite un investissement en matériel à peine plus coûteux que celui exigé par la méthode graphique, mais elle apporte une très nette économie de temps pendant lequel le personnel chargé des mesures hydrométriques peut se consacrer à des travaux un peu moins fastidieux que le tracé ou le planimétrage des paraboles. Cependant la détermination graphique doit être faite au bureau lorsque la section n'a pas encore fait l'objet de nombreux jaugeages ou lorsque l'écoulement est assez irrégulier.

IV. 4. DÉPOUILLEMENT DU JAUGEAGE PAR INTÉGRATION

La préparation des feuilles et les corrections à apporter au dépouillement sont à peu de choses près les mêmes que pour les jaugeages point par point.

IV. 4. 1. MÉTHODE GRAPHIQUE

- Tracer la section en travers à une échelle convenable comme pour le dépouillement par la méthode des paraboles,

- Calculer la vitesse moyenne à partir de N et T mesurés sur la totalité de la verticale et de la formule d'étalonnage du moulinet,

- Calculer le débit élémentaire sur chaque verticale en multipliant la profondeur totale par la vitesse moyenne.

- Porter ces débits à l'échelle choisie sur le graphe de la section en travers et tracer la courbe des débits,

- Planimétrer cette courbe et en déduire la valeur du débit.

La méthode par intégration ne nécessite pas le tracé et le planimétrage des paraboles de vitesse, ce qui fait gagner un temps appréciable au dépouillement par rapport au jaugeage point par point.

IV. 4. 2. MÉTHODE ARITHMÉTIQUE

On adopte la même méthode que pour le jaugeage point par point. Le fait de n'avoir qu'une valeur de N et T par verticale simplifie notablement le programme de calcul.

IV. 4. 3. CAS OÙ IL N'A PAS ÉTÉ POSSIBLE D'ESTIMER LA VITESSE AU VOISINAGE DU FOND

Nous avons vu que lors des crues rapides, il n'est pas facile (et même dangereux pour le moulinet) d'estimer la vitesse moyenne sur la hauteur séparant l'axe de l'hélice de la semelle du contact de fond. On peut, à l'aide de jaugeages effectués à la même station par la méthode point par point, définir le rapport K entre la vitesse moyenne près du fond et la vitesse moyenne entre ce point et la surface. Soit U la vitesse moyenne entre la surface et le point situé juste au-dessus du fond, U_F la vitesse moyenne sur la portion de verticale correspondant à la constante de fond C. On a : $U_F = KU$. Si p est la profondeur obtenue après correction de la lecture du compteur à partir de l'angle de dérive α le débit unitaire aura pour valeur :

$$q = p \cdot U + C \cdot U_F = U(p + KC)$$

Lorsqu'il n'est pas possible d'estimer la valeur de K, on peut prendre sans trop de risques d'erreur : K = 1/3.

IV. 5. DÉPOUILLEMENT DU JAUGEAGE CONTINU OU PAR VERTICALES INDÉPENDANTES

Le dépouillement d'un jaugeage continu par verticales indépendantes est au départ, celui d'un jaugeage point par point ou par intégration suivant le mode opératoire utilisé sur le terrain : calcul des vitesses,tracé et planimétrage des paraboles(point par point) ou calcul direct des débits élémentaires (intégration).

Si l'on opère point par point, il peut être intéressant de grouper les paraboles d'une même verticale sur un même graphe avec origine commune au fond : ceci permet de détecter les erreurs de mesure (vitesses, profondeurs), de suivre les déformations de la parabole, de reconstituer au mieux par comparaison, les paraboles incomplètes obtenues au cours de mesures partielles. Dans ce dernier cas, la reconstitution est précise si la parabole incomplète est comprise entre deux paraboles complètes ; si la parabole est plus grande que la dernière parabole complète, le tracé est plus hasardeux (figure 67).

Cette façon de procéder permet donc de "récupérer", dans une certaine mesure, les paraboles qui, pour des raisons diverses (vitesse trop grande, charriage important, etc...), n'ont pas pu être conduites jusqu'au fond. Il ne faut pas conclure que quelques verticales complètes suffisent pour obtenir une mesure correcte. Cette méthode permet d'utiliser au mieux une mesure partielle, mais le résultat ne sera qu'une estimation qui pourra servir de guide pour l'extrapolation limitée de la courbe d'étalonnage de la verticale indépendante.

La seconde phase du dépouillement consiste à tracer les courbes d'étalonnage de chacune des verticales indépendantes. Il faut un nombre de points suffisants : 5 au minimum, avec une dispersion relativement faible, pour permettre un tracé précis. Cette courbe d'étalonnage ne sera extrapolée vers le haut ou vers le bas que dans des limites faibles (20 à 30 cm de l'échelle des hauteurs). Les courbes de plusieurs verticales peuvent être groupées sur un même graphe (voir figure 68).

Dans le cas de stations stables, les points doivent se placer correctement sur la courbe. S'il y a des points trop éloignés, il faut en rechercher la cause : forte dérive du saumon qui entraîne une correction importante de la profondeur, moulinet détérioré ou ensablé (à vérifier constamment pendant les mesures sur le terrain).

Paraboles des vitesses successives sur une verticale independante

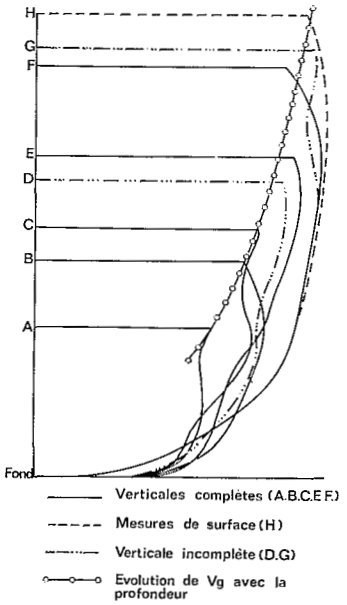


Fig. 67

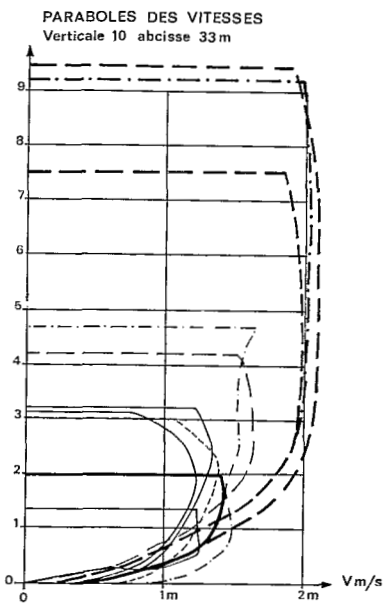


Fig. 68

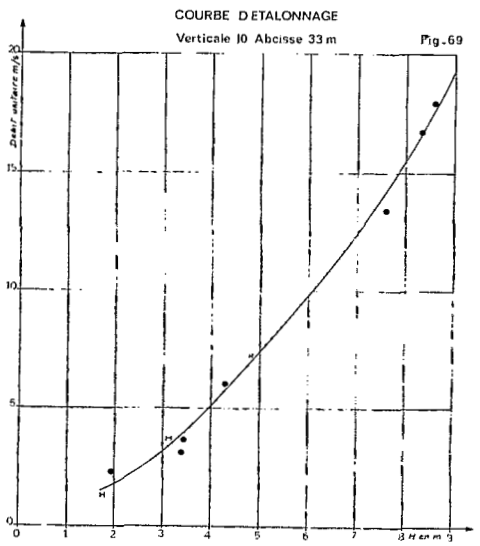


Fig. 69

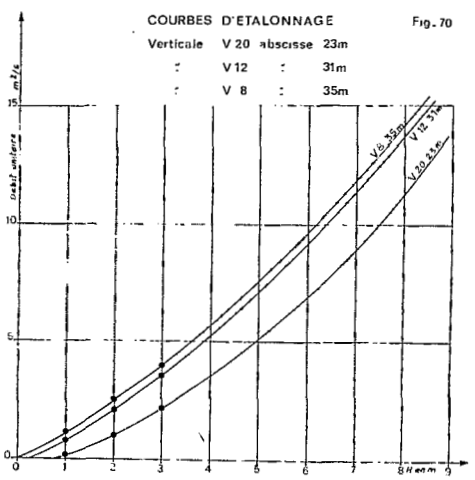


Fig. 70

Avec les stations à fond mobile, cette méthode ne donne pas de bons résultats et elle ne doit pas être utilisée.

La dernière étape est l'intégration des débits unitaires. Elle se fait comme pour un jaugeage complet.

- On porte sur un graphe la position des verticales et des rives à une échelle convenable.

- Les débits unitaires pour une hauteur à l'échelle H entière, sont lus sur chacune des courbes des différentes verticales et sont portées sur le graphe ci-dessus. Les points correspondants à la même hauteur H sont reliés entre eux.

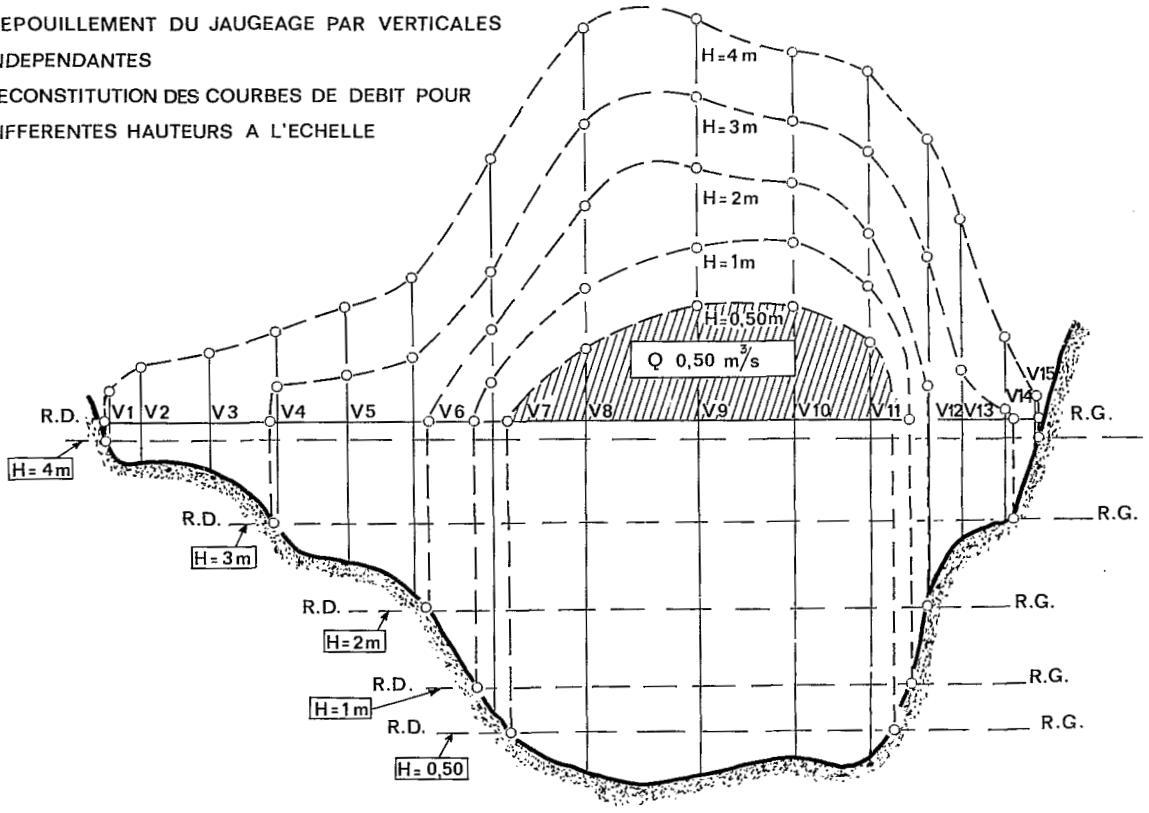
- La surface ainsi délimitée est planimétrée à deux reprises. On obtient ainsi le débit pour les différentes hauteurs H choisies arbitrairement.

Pour arriver à ce résultat , il est bien évident que plusieurs crues sont nécessaires. A la décrue, il arrivera souvent qu'une ou plusieurs traversées se fassent avec des variations faibles du plan d'eau. Ces mesures seront traitées comme des jaugeages complets et la valeur du débit sera affectée de la cote à l'échelle au début et à la fin de la traversée.

La figure 68 montre le tracé des paraboles sur la verticale N° 10 d'un jaugeage réel. La figure 69 représente la courbe d'étalonnage Q m2/s = f(H) sur cette parabole. Sur la figure 70 sont portées les courbes Q m2/s = f(H) pour les paraboles V8, V12 et V20, et en noir les points qui serviront à reconstituer les courbes de débit représentées sur la figure 71.

Fig. 71

DEPOUILLEMENT DU JAUGEAGE PAR VERTICALES INDEPENDANTES
RECONSTITUTION DES COURBES DE DEBIT POUR DIFFERENTES HAUTEURS A L'ECHELLE



IV. 6. DÉPOUILLEMENT DES JAUGEAGES AUX FLOTTEURS

IV. 6. 1. MÉTHODOLOGIE

Le débit Q est égal au produit de la section transversale (ou section mouillée) S par la vitesse moyenne de l'écoulement U.

Q m3/s = S m2. U m/s

Il faut séparer le débit dans le chenal principal du débit dans les plaines d'inondation.

S est calculée à partir des profils en travers levés avant et après la crue en une ou deux sections, les sections matérialisées par les balises AB et CD par exemple. Il faut tenir compte de la nature du fond du lit et bien vérifier qu'il n'y a pas eu affouillement pour les vitesses maximales.

U est estimée à partir des vitesses de surface, à l'aide du rapport K = U/Vms calculé pour les jaugeages complets qui ont pu être réalisés à la station (Vms est la vitesse moyenne de surface). La figure 72 montre quelques exemples de variation du rapport U/Vms en fonction de Q ou de H.

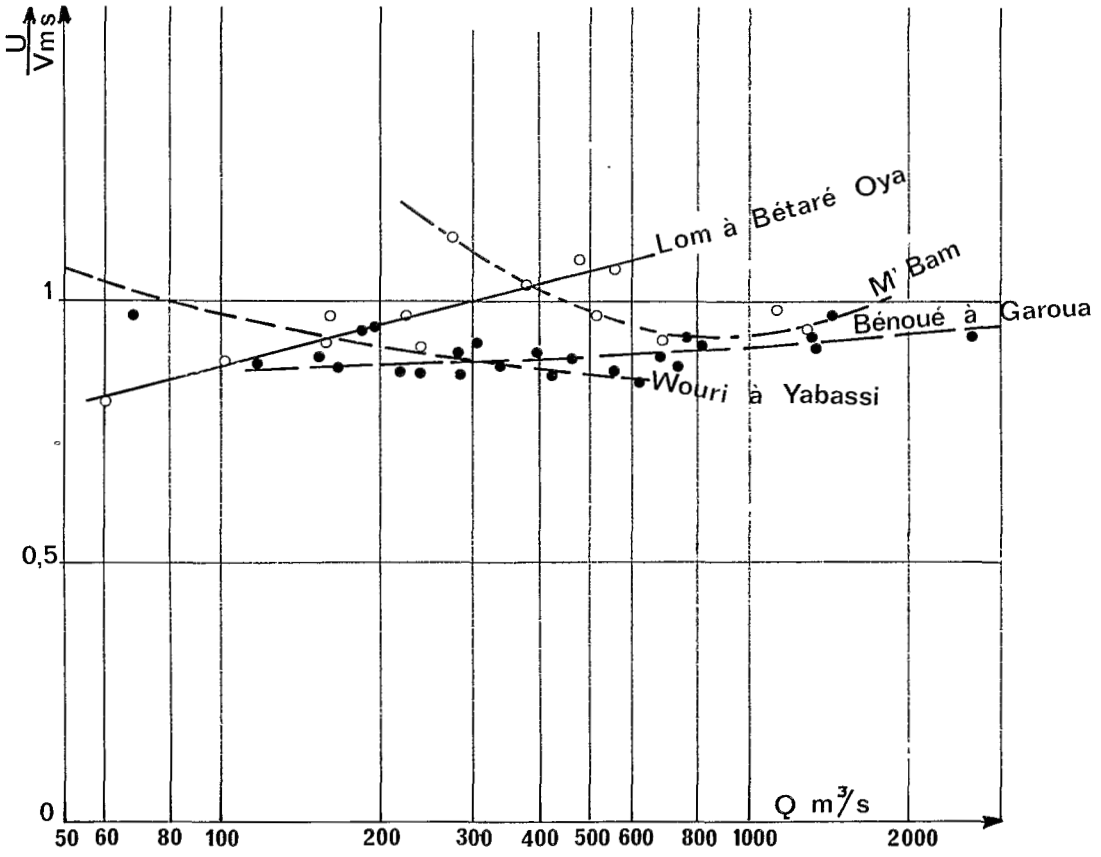


Fig.72 VARIATIONS DU RAPPORT $\frac{U}{Vms}$

IV. 6. 2. CALCUL DE LA VITESSE MOYENNE EN SURFACE Vms

On utilisera la méthode d'intégration graphique couramment utilisée pour les jaugeages point par point ; mais auparavant, il faut calculer pour chaque flotteur la vitesse et la position par rapport à la base AB. Ces calculs permettent de tracer le graphe 73 à partir duquel sera calculée la vitesse moyenne en surface.

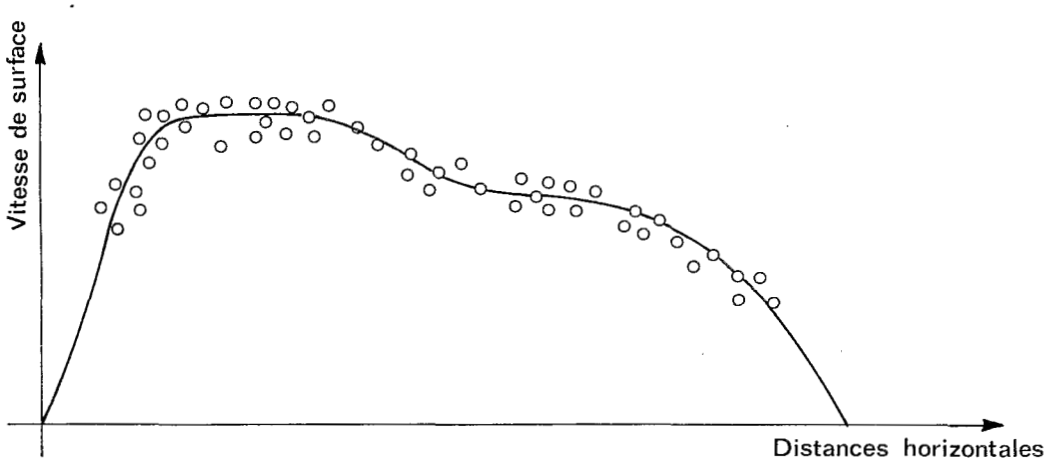
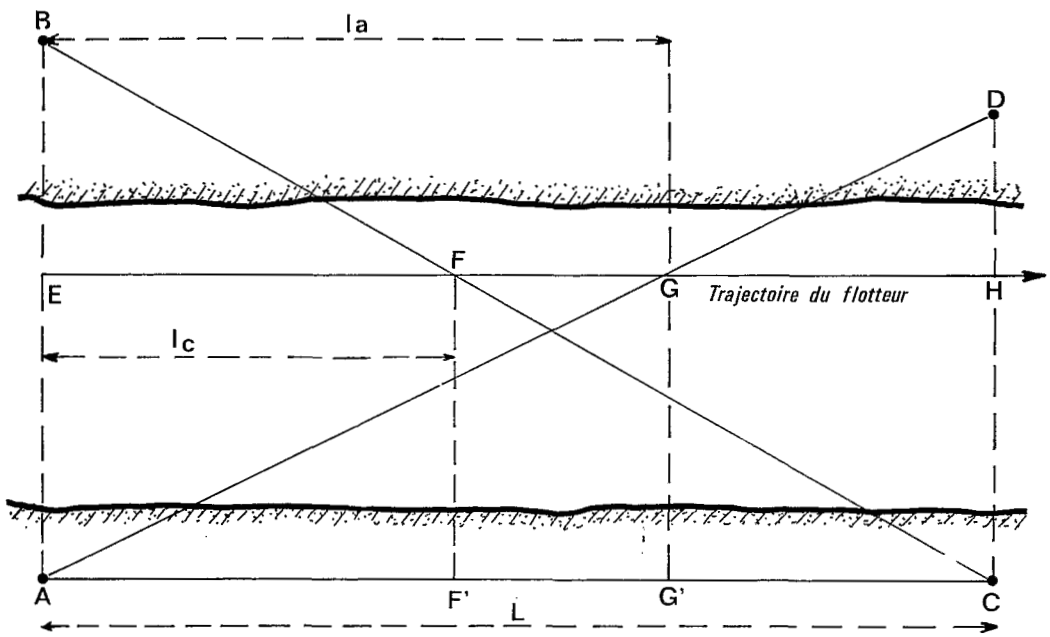


Fig.73 REPARTITION DES POINTS DE MESURES DANS LA SECTION

IV.6 2 1. Calcul des vitesses des flotteurs

Nous supposerons que les balises AB et CD sont perpendiculaires à la direction de l'écoulement et que AC est parallèle à cette même direction comme le montre la figure 74 .

Fig_74



Si les lignes AB et CD font un angle α avec la perpendiculaire à la direction du courant, il faut corriger la position des flotteurs en multipliant les valeurs trouvées par les formules que nous donnons ci-après, par cos α . Les vitesses ne sont pas modifiées.

Sur la figure 74 nous avons :

. AC = L parcourue pendant les temps T_a mesuré par l'observateur C, avec $T_a \neq T_c$

. EF = ℓ_c correspondant à un temps t_c

. EG = ℓ_a correspondant à un temps t_a

. FF' = x_c (abscisse du flotteur déterminée à l'aide des mesures de l'observateur C)

. GG' = x_a (abscisse du flotteur déterminée à l'aide des mesures de l'observateur A)

Si V est la vitesse du flotteur supposée constante entre les deux sections AB et CD , nous avons :

$$V_a = L/T_a \qquad \text{et } V_c = L/T_c$$

Aux erreurs de mesure près on doit avoir :

$$V_a = V_c$$

D'où :

$$V = \frac{V_a + V_c}{2}$$

IV.6 2 2. Position des flotteurs

Dans le triangle ADC, on a :

$$\frac{GG'}{DC} = \frac{AG'}{AC} = \frac{\ell_a}{L} = \frac{V_a\, t_a}{V_a\, T_a}$$

$$GG' = x_a = \frac{t_a}{T_a}\ CD$$

Dans le triangle ABC on a :

$$\frac{FF'}{AB} = \frac{F'C}{AC} = \frac{L - \ell_c}{L} = \frac{V_c(T_c - t_c)}{V_c\, T_c}$$

$$FF' = x_c = \frac{T_c - t_c}{T_c}\ AB$$

Si les mesures sont réalisées correctement et si la trajectoire du flotteur est bien parallèle à AC, on a : $x_a \neq x_c$

La position du flotteur par rapport à la base AC sera donnée par :

$$x = \frac{x_a + x_c}{2}$$

Dans le cas de sections obliques de α par rapport à la direction d'un courant l'abscisse sera $x' = x \cos\alpha$

Les calculs seront effectués sur une fiche de dépouillement dont un modèle est donné par la figure 75.

IV.6.3. CALCUL DU DÉBIT

Les vitesses et les abscisses des flotteurs étant connues, on trace la section mouillée et on reporte en abscisse la position des divers flotteurs et en ordonnée la vitesse mesurée. On obtient une figure ayant l'allure du graphe 73. Les points seront plus ou moins dispersés. La courbes des vitesses moyennes superficielles sera tracée, au mieux, au milieu du nuage. La surface limitée entre la courbe et le plan d'eau sera ensuite planimétrée. Cette valeur, divisée par la largeur totale, donnera la vitesse moyenne superficielle.

Si l'on dispose de jaugeages complets pour des cotes inférieures, on tracera la courbe donnant la variation de K = U/Vms en fonction de H (figure 72). On en déduira, pour la cote à l'échelle pour laquelle a été effectué le jaugeage aux flotteurs, une valeur de K d'où une valeur de U, et finalement le débit Q.

S'il n'y a pas eu de jaugeages à la station et si l'on n'a aucune indication sur la variation de U/Vms dans la section que l'on étudie, on pourra prendre les valeurs qui ont été données au paragraphe I.3 1 2 2.

Fig_75

JAUGEAGE AUX FLOTTEURS — FICHE DE DEPOUILLEMENT

N°: Date : Rivière : Station :

Opérateurs Terrain : Dépouillement :

I. DONNEES TOPOGRAPHIQUES — D'après levé du :

- Base longitudinale : AC = L = m largeur moyenne l = m
- Sections transversales Amont AB = m Aval CD = m
- Distances à la rive Balise A = m Balise C = m

Si balisage oblique

- Angle AB avec perpendiculaire au courant α = ° cos α =

II. SECTION MOUILLEE — D'après profils du :

Heure	Côte	Section mouillée				
		Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Moyenne

III. CALCUL DES VITESSES ET DES ABSCISSES X

N°	Ta	Tc	$\frac{L}{Ta}$	$\frac{L}{Tc}$	V	ta	$\frac{ta}{Ta}$	$\frac{ta}{Ta}$ x AB	tc	$\frac{tc - tc}{Tc}$	$\frac{tc-Tc}{Tc}$ CD	X
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

IV. 6. 4. CAS DES JAUGEAGES AUX FLOTTEURS AVEC VITESSES TRÈS FAIBLES

Afin de tenir compte du fait que le flotteur ne donne pas la vitesse moyenne sur la totalité de la verticale, on calcule le débit élémentaire en multipliant la vitesse mesurée par une profondeur fictive égale à la moyenne de la profondeur réelle Pr mesurée avec une mire graduée et la longueur immergée du flotteur F_1 :

$$P = \frac{Pr + F_1}{2}$$

d'où : $q = P \times V$

Dans le cas de vitesses très faibles, cette méthode donne d'excellents résultats.

Ne pas oublier que :

Les mesures aux flotteurs ne doivent être faites que lorsque le moulinet devient inutilisable ou que son utilisation risque d'entraîner la perte de l'équipement. Faites avec soin, elles permettent d'obtenir une estimation satisfaisante du débit. Elles demandent pour cela, un entraînement des équipes et une préparation préalable du terrain.

V. CONCLUSION

Nous ne prétendons pas avoir établi un catalogue complet des matériels et des méthodes utilisés dans la mesure des débits par la mesure des vitesses. Certains trouveront que des appareillages assez courants n'ont pas été cités ou qu'il n'a pas été fait mention de méthodes utilisées avec succès dans tel ou tel pays. Nous avons essayé de faire un choix, afin de présenter le matériel le plus récent dont l'utilisation est susceptible de donner les résultats les meilleurs avec une mise en oeuvre rapide et facile. Il en est de même pour les méthodes.

A notre avis, il n'est pas utile d'encombrer l'esprit des gens avec une multitude de recettes. L'essentiel est d'en bien connaître une ou deux de façon à être capable de les mettre en application rapidement et sans hésitation.

Nous estimons que le moulinet rendra encore pendant longtemps de grands services aux hydrométristes. Evidemment, il serait tentant de pouvoir se passer de cet instrument qui est quand même assez fragile et qui court toujours de grands risques dans les rivières en crue. Les recherches dans ce sens se poursuivent et les mesures de débits par les méthodes globales (méthodes de dilution par traceurs chimiques ou radioactifs) donnent des résultats très encourageants dans une gamme de débits assez large. En 1832, Faraday avait envisagé de mesurer le débit d'une rivière en détectant la force électromotrice créée par la masse d'eau coupant les lignes du champ magnétiques terrestre. Malheureusement,les tensions ainsi obtenues sont extrêmement faibles et étaient difficilement mesurables à l'aide des appareils dont on disposait à l'époque.

Avec le développement de la technologie électronique des hydrologues Japonais ont réussi à enregistrer la différence de potentiel créée par le champ magnétique terrestre entre deux électrodes placées aux deux extrémités d'une section en travers d'une rivière. Des essais analogues ont été réalisés de 1964 à 1971 sur des rivières canadiennes. Ces enregistrements montrent une bonne corrélation entre les tensions mesurées et la vitesse du courant, mais on observe également quelques anomalies dues à des champs magnétiques parasites.

D'autres essais ont été réalisés en Grande Bretagne en créant un champ magnétique artificiel à l'aide d'une bobine placée en travers du lit de la rivière. Les tensions obtenues aux bornes des électrodes sont plus importantes et l'influence des champs parasites pratiquement négligeable. Cependant, le coût très élevé des installations rend difficile la généralisation de cette méthode.

Les ultra-sons donnent actuellement de bons résultats dans le cas d'écoulements parfaitement canalisés. Dans quelques années, d'autres méthodes verront le jour qui simplifieront peut être la tâche de l'hydrométriste.

Mais en attendant, l'appareil idéal qui donnera directement la valeur du débit d'une rivière, nous devons continuer à mesurer avec les moyens dont nous disposons. Ceux-ci, malgré leur apparence assez fruste et parfois un peu rudimentaire en comparaison des puissantes machines auxquelles peuvent accéder certaines disciplines, donnent des résultats d'une précision très acceptable qui ne serait probablement pas améliorée par un matériel plus sophistique. Car, comme le dit le Professeur Santon :

> -"*Plus perfectionné est l'instrument et plus nombreuses sont les causes d'erreur qu'il peut introduire, plus grande doit être la vigilance de l'expérimentateur, plus aigü le sens critique avec lequel il doit déceler les défaillances de l'appareil....*".

BIBLIOGRAPHIE

1. M. ROCHE
   Hydrologie de surface
   ORSTOM - Gauthier-Villars - Paris 1963

2. H. ANDRE, M. AUDINET, G. MAZERAN et C. RICHER
   Hydrométrie pratique des cours d'eau
   Eyrolles - Paris 1976

3. A. TROKOLANSKI
   Théorie et pratique des mesures hydrauliques
   Dunod - Paris 1962

4. L. CASTEX
   Hydraulique - Mesure et essais;applications aux études sur modèles réduits et aux essais à caractère industriel
   Cours professé à l'ENSEEIHT

5. O M M guide des pratiques hydrométéorologiques N° 168 TP 82

6. O M M Instruments, observations et réseaux hydrométéorologiques en Afrique. Cycle d'études d'Addis-Abeba du 2 au 20 octobre 1967

7. J. RODIER
   Les jaugeages au moulinet et au flotteur à l'heure du calcul automatique
   Colloque international sur l'Hydrométrie - Coblence 13-19 sept. 1970

8. P. BOURGUIGNON
   Jaugeage au moulinet - Chapitre II : exécution des relevés.
   E.D.F. Direction des Etudes et Recherches, Division "Essais Extérieurs", Paris mai 1952, pages 13-45
   Société Hydrotechnique de France : Mesure des débits - Méthode de jaugeage par exploration du champ de vitesses - Fascicule N° 3.

9. Y. CORMARY
   Les jaugeages au moulinet et au flotteur -
   Stage technique d'Hydrométrie - Nîmes 22 Mai-3 Juin 1967

10. J. RICARD
    Mesure de la vitesse des liquides
    Techniques de l'Ingénieur - Fascicule R 2110 - p. 1 à 14.

11. G. JACCON et M. TOURNE
Jaugeage par la méthode des verticales indépendantes - théorie et mise en pratique - Exemple complet
D.E.M.R.H. note technique 6/SHYL - Mars 1975

12. G. JACCON et M. TOURNE
Estimation d'un débit de crue par la mesure des vitesses de surface - Jaugeages aux flotteurs
D.E.M.R.H. - Note technique N° 57/SHYL - Février 1975

13. G. JACCON
Nouvelle méthode de jaugeage au cercle hydrographique
ORSTOM - Note technique N° 11

14. G. JACCON
Choix de l'hélice de moulinet C 31 à utiliser pour un jaugeage
D.E.M.R.H.
Note 29/SHYL Septembre 1974

15. J. CRUETTE
Jaugeage au moulinet et au flotteur
BIRH Tunis

16. LEFEVRE B.
Mesure des débits
ORSTOM - Service Hydrologique, Yaoundé , 52 p

17. OBERLIN G.
Quelques remarques complémentaires au sujet des méthodes de jaugeage au moulinet
CTGREF Antony - Note du 27.2.70 - 19 pages ronéo

18. POUYAUD B.
Premiers jaugeages précis réalisés par l'ORSTOM sur le Congo à Maluku-Tréchot.
Cahier ORSTOM série Hydrologie, volume IX, 1972

19. R. HLAVEK
Généralités sur la mesure des débits dans les cours d'eau
Stage de Nîmes - 22 Mai au 3 Juin 1967

20. R. HLAVEK
La mesure directe des débits dans les cours d'eau
Stage de Nîmes - 22 Mai au 3 Juin 1967

21. D. LE GOURIERES
Hydrologie - eaux de surface.
Cours de l'Ecole Fédérale Supérieure d'Agriculture
Université Fédérale du Cameroun

22. J. BAILLEUX
Le matériel hydrométrique
Stage de Nîmes du 22 Mai au 3 Juin 1967

23. P. LE DUC
Note d'exécution des jaugeages aux flotteurs de nuit dans l'ADERDOUTCHI (Niger) en 1966
5 pages dactylographiées, une figure.

24. ALDEGHERI M.
Quelques améliorations apportées à la technique des jaugeages en rivière
ORSTOM - Note technique N° 36 - Octobre 1974

25. GEORGE F.
Smoot flow measurement of some of the World's Major Rivers by the moving-boat Method U.S. Geological Survey
Colloque sur l'Hydrométrie - Coblence - Septembre 1970

26. NEYRPIC - Département Mesures
Le matériel d'hydrologie mesure des vitesses, mesure des débits, mesures de niveaux, prélèvement sur cours d'eau, retenues naturelles ou artificielles (6 pages)

27. NEYRPIC - Département Mesures
Note sur la méthode de jaugeage au moulinet et la méthode graphique de Harlacher pour le calcul du débit (4 pages)

28. J. THIEBAUX
Le matériel hydrométrique (note ronéotypée)

29.
La mesure des débits liquides - tendances actuelles
N° spécial de la Houille Blanche N° 5/1969

30. I.S.O. (Organisation Internationale de Normalisation) Normes Internationales :
- N° 2537 : Mesure du débit des liquides dans les canaux découverts, moulinets à coupelles et à hélices.
- N° 748 : Mesure du débit des liquides dans les canaux découverts. Méthode d'exploration des champs de vitesses.
- N° 1088 : Mesure du débit des liquides dans les canaux découverts. Méthode d'exploration du champ de vitesses - Recueil des données pour la détermination des erreurs de mesurage.
- N° 772 : Mesure du débit des liquides dans les canaux découverts. Vocabulaire et symboles.

31. TOSHIO TAKENOUCHI et TOSHIHIKO TERAMOTO
Discharge measurement by observing the electric field induced in a river due to a geomagnetic field
1963

32. H. RYCKBORST et R.O. CHRISTIE
Feasibility of electromagnetic stream flow measurements using the earth's field
Bulletin des Sciences Hydrologiques XXII, 2 6/1977

33. Voir également comptes-rendus du Symposium de Reading (décembre 1974) sur le jaugeage des rivières par les méthodes ultrasoniques et électromagnétiques organisé par Water Research Center et Water Data Unit.

34. M. ALDEGHERI
Stations téléphériques de jaugeage : description, notes de calculs et règles à observer pour leur installation
Cahiers ORSTOM série Hydrologie (en préparation)

35. OTT Documentation et tarifs instruments d'hydrométrie

36. OTT Moulinets et leurs accessoires - Tarifs 103

37. NEYRPIC Mesures Hydrauliques - Documentation matériel hydrométrie

38. J. CALLEDE
Le cercle hydrographique
Note Ronéo - 11 pages

39. Y. L'HOTE
Techniques d'Hydrométrie
SRAE Lorraine.

40. J. CRUETTE et J.A. RODIER
Mesure de débits de l'OUED ZEROUD pendant les crues exceptionnelles de l'automne 1969
Cahier ORSTOM, série Hydrologie, volume VIII, n°1 - 1971

ANNEXE

I. QUELQUES MOULINETS USUELS

II. LES COMPTEURS D'IMPULSIONS

III. LES PERCHES

IV. LES TREUILS

V. LES CYCLOPOTENCES

VI. MONTAGES SUR BATEAU

VII. LES TELEPHERIQUES : CALCULS DES FLECHES ET DES TENSIONS

VIII. TRAVAUX DE BUREAU

I. QUELQUES MOULINETS USUELS

I.1. Moulinet Arkansas type V (10 050)

I.1.1. Documentation

Voir notice OTT HB f 10 050 05

I.1.2. Remarques

Moulinet à axe fixe.

Le tableau ci-dessous indique les types d'hélices pour moulinet type V et les domaines de mesure correspondants. Il faut noter que les hélices en plastique, bien que ne figurant pas sur ce tableau, peuvent être montées sur le moulinet type V.

Les figures 72 et 74 de la notice montrent les zones de contact et la manière de les remettre en place sur les figures 76 à 79.

Le changement des roues et des gaines pour modifier la cadence des tops doit être fait avec soin. Il est interdit d'utiliser une gaine à pas simple avec une roue à pas quintuple et vice-versa. Ceci entraîne une usure rapide des engrenages et un détarage important du moulinet d'où jaugeage faux, irrécupérable et détérioration du matériel.

Les montages corrects sont donnés sur la figure 1.

Les montages corrects ne peuvent donner que 1 top tous les 1, 2, 10 ou 20 tours d'hélice. Toute autre cadence est due à un montage incorrect. Vérifier, dans ce cas, le montage avec soin.

La figure 2 montre les différents montages incorrects.

- Il faut noter que les montages donnant un contact après un et deux tours d'hélice, sont réservés pour les mesures avec compteurs à chiffres sauteurs. Les montages donnant un contact pour 10 ou 20 tours d'hélice sont utilisés avec des appareils à signaux lumineux ou sonores.

- Le commentaire de la figure 72 est très important en eaux chargées de sable et limons très fins. Laisser la chambre du levier et de la roue dentée ouverte pendant la mesure.

Types d'hélices pour moulinets V et domaines de mesure correspondants

Vitesses d'écoulement minimales mesurables

Types d'hélices	Diamètre de l'hélice	Pas de l'hélice	Vitesse d'écoulement
	mm	m	env. m/s
Hélice normale	80	0,125	0,06 – 0,07
	125	0,250	0,05 – 0,06
	125	0,500	0,06 – 0,07
	125	1,000	0,08 – 0,10
Hélice *autocomposante* **R**	100	0,250	0,05 – 0,06
Hélice autocomposante **A**	100	0,120	0,05 – 0,06

Vitesses d'écoulement maximales mesurables

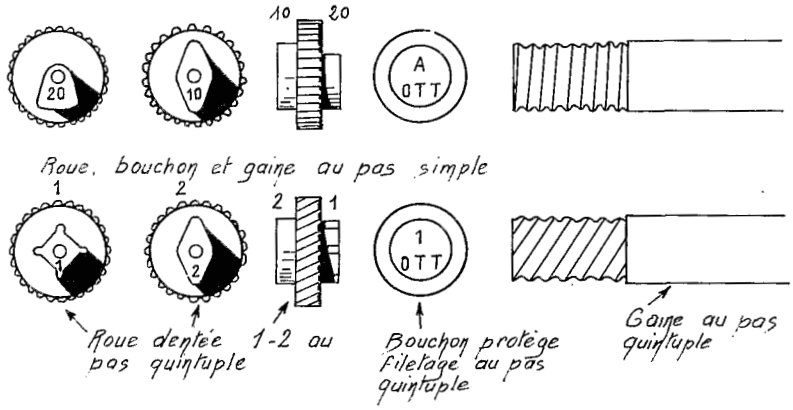
Les possibilités de mesure dépendent de la combinaison des pièces assurant les contacts, du pas de l'hélice et de la nature du récepteur des impulsions. Le tableau suivant est basé sur la condition que le compteur de tours réponde encore en toute certitude sous 10 Hz et que pour les mesures avec signaux acoustiques, le temps qui sépare deux signaux est au moins de deux secondes.

Pas de l'hélice m	Nombre de tours de l'hélice par contact	Vitesse d'écoulement m/s	
		Signaux acoustiques	Compteur de tours
0,125	1 ou 2	–	à 1,25 ou 2,5
0,125	10 ou 20	à 0,625 ou 1,25	–
0,250	1 ou 2	–	à 2,5 ou 5,0
0,250	10 ou 20	à 1,25 ou 2,5	–
0,500	1 ou 2	–	à 5,0 ou 10,0
0,500	10 ou 20	à 2,5 ou 5,0	–
1,000	1 ou 2	–	à 10,0 ou 20,0
1,000	10 ou 20	à 5,0 ou 10,0	–
Hélice autocomposante **R**		jusqu'à une obliquité d'écoulement de 15°	max. 5 m/s
Hélice *autocomposante* **A**		jusqu'à une obliquité d'écoulement de 45°	max. 2,5 m/s

Les valeurs ci-dessus sont susceptibles de varier dans des limites restreintes, suivant la nature de la suspension ou de la fixation du moulinet, par suite de l'effet de retenue que cette suspension ou cette fixation exerce dans l'écoulement.

Fig_1

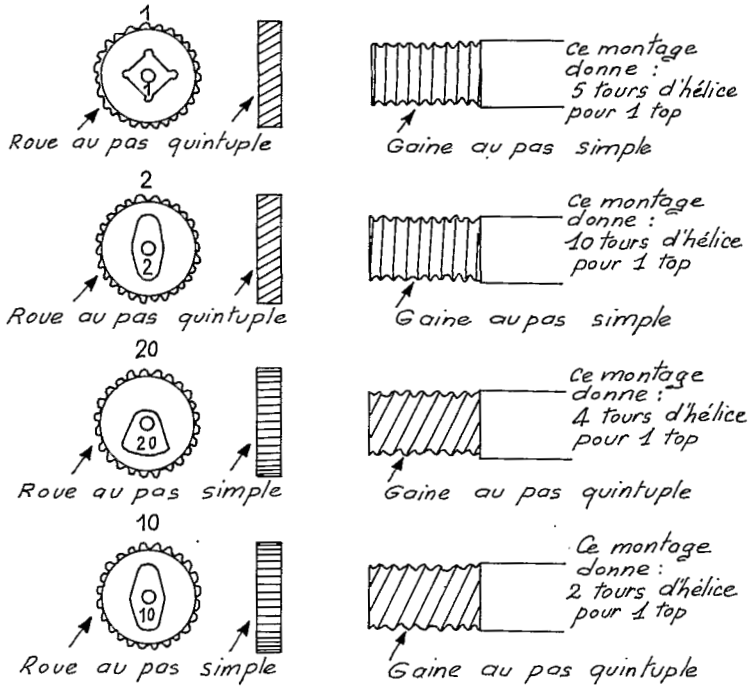
MONTAGES CORRECTS DES GAINES ET ROUES DENTÉES DE MOULINET



Il est absolument impératif de compter le nombre de tours d'hélice par contact et le noter sur la feuille de jaugeage avant chaque jaugeage

Fig_2

MONTAGES INCORRECTS DES GAINES ET ROUES DENTEES DE MOULINET


1
Roue au pas quintuple
Ce montage donne : 5 tours d'hélice pour 1 top
Gaine au pas simple
2
Roue au pas quintuple
Ce montage donne : 10 tours d'hélice pour 1 top
Gaine au pas simple
20
Roue au pas simple
Ce montage donne : 4 tours d'hélice pour 1 top
Gaine au pas quintuple
10
Roue au pas simple
Ce montage donne : 2 tours d'hélice pour 1 top
Gaine au pas quintuple

- La forme peu hydrodynamique du corps, au niveau du raccordement avec l'hélice, entraîne quelques difficultés en eaux chargées. Les grains de sable viennent en effet se bloquer entre le manchon vissé de l'hélice et la colerette du corps et finissent par provoquer une usure importante de ces deux pièces qui facilite l'entrée de grains de plus en plus gros. L'utilisation de ce moulinet est de ce fait peu pratique avec les téléphériques à grande portée installés sur des rivières à fond sableux. Dans ce cas, il faut placer le moulinet le plus haut possible au-dessus du saumon et avoir un contact de fond en bon état de fonctionnement.

- Bien que la chambre de contact soit conçue pour être parfaitement étanche, il peut se produire parfois des entrées d'eau qui peuvent nuire au bon fonctionnement des contacts et amener, à la longue, leur oxydation.

En conclusion :

- Moulinet très robuste qui mérite la désignation de "moulinet universel" qu'il a portée pendant près de 50 ans.

I.2. Moulinet OTT universel C 31 type 10 002

I.2.1. Documentation

Voir notices H1f 120/4 et 112/01 Af.

I.2.2. Remarques

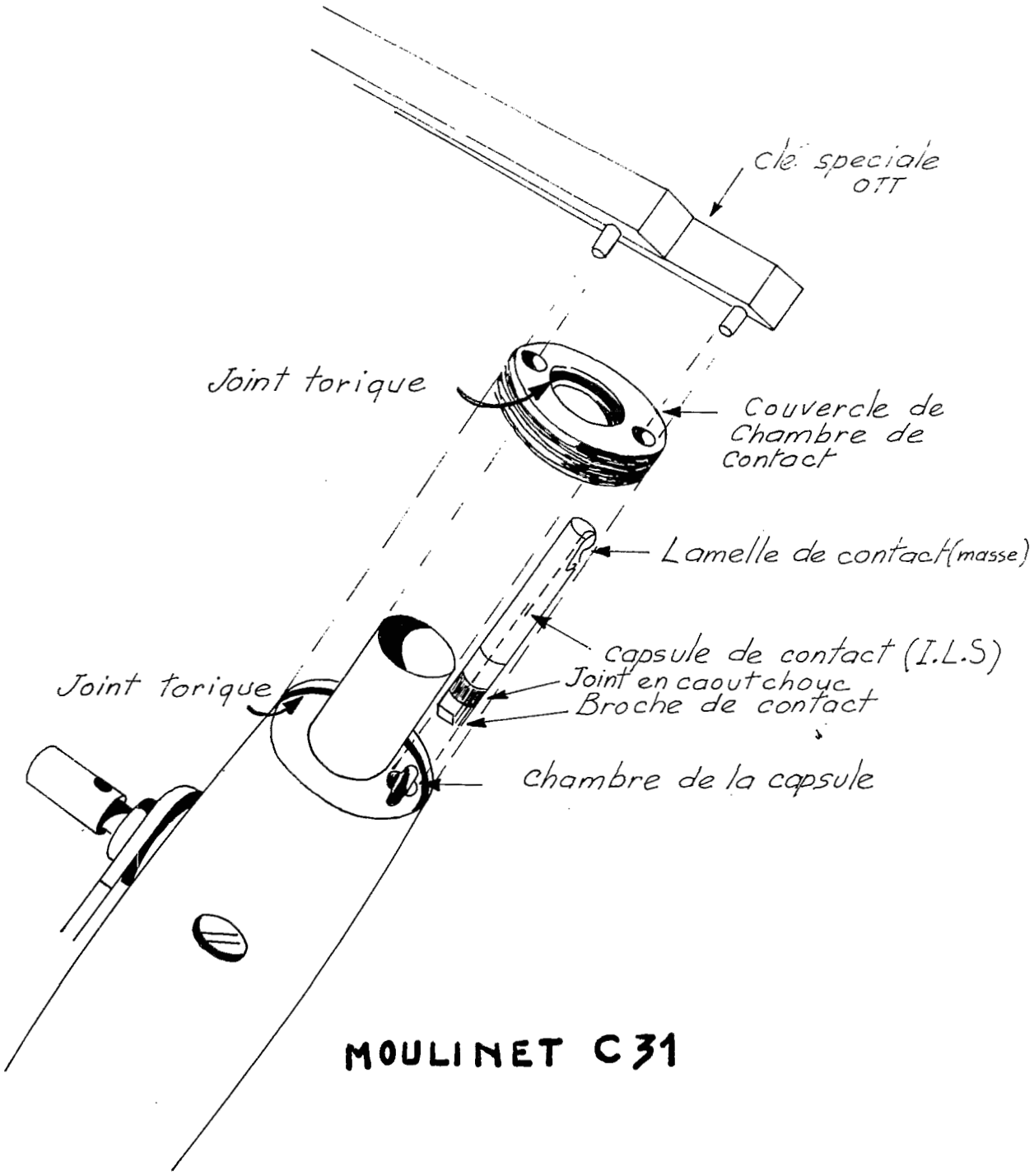
- Moulinet à axe fixe dont le corps de forme hydrodynamique diminue les risques d'ensablement,

- Le contact (ILS) peut s'oxyder au bout d'un temps relativement long. Lors du changement auquel on procède comme indiqué dans la notice 112.101 Af et la figure 3 ; bien prendre soin de retirer le joint en caoutchouc entourant les broches de contact (il reste, en effet, presque toujours au fond du logement, quand on retire la capsule de contact). Utiliser pour cela une fine tige de fer coudée.

MOULINET OTT C 31

Fig _ 3

Remplacement de la capsule de contact



- La gaine d'axe portant l'aimant permanent doit être manipulée avec soin. Il faut éviter les chocs qui peuvent briser l'aimant et entraîner des modifications dans la fréquence des signaux.

- Dans la mesure du possible, éviter de laisser tourner le moulinet dans l'air par vent violent. La vitesse de rotation importante peut entraîner la détérioration de l'interrupteur à lames souples.

I.3. Petit moulinet OTT C1 type 10 150

I.3 1. Documentation

Voir notices HLf 120/3 et 111.103 Af

I.3 2. Remarques

- Moulinet à axe mobile destiné à la mesure des vitesses en laboratoire ou sur rivières exemptes de transports solides (étiages),

- Contacts relativement fragiles,

- Ne s'emploie jamais monté sur un poids de lestage.

- Il n'est pas recommandé d'utiliser le moulinet C1 avec le compteur F6. La tension d'alimentation de ce compteur (9 V) est un peu trop forte et risque d'endommager les contacts.

- Au cours d'un jaugeage assez long, il peut arriver que de petite gouttes d'eau se trouvent rassemblées dans la chambre de contact et que, de ce fait, l'émission des impulsions soit un peu perturbée. Nettoyer la chambre et mettre de l'huile neuve.

I.4. Petit moulinet OTT C2 type 10 152

I.4 1. Documentation

Voir notices HLf 120/22 et HBf 10.150/04

I.4_2. Remarques

- Moulinet à axe mobile.

- La suppression du contact mécanique est une amélioration très nette par rapport à l'ancien moulinet C1.

- L'entretien est simplifié. Le fonctionnement n'est pas influencé par les gouttelettes d'eau pouvant pénétrer dans la chambre des roulements.

I.5. Moulinet OTT à génératrice de courant C60 type 10 300

I.5_1. Documentation

Voir notices HLd 120/23, HLf 120/5 et HBf 10.300 01

I.5_2. Remarques

- Moulinet à axe fixe robuste, d'un fonctionnement très sûr, grâce à une génératrice de précision qui supprime en particulier tous les ennuis dus aux contacts défectueux que l'on a avec les moulinets classiques.

- Utilisé avec le nouveau compteur CJR 30 (voltmètre intégrateur), ce moulinet simplifie le dépouillement des jaugeages en rivière.

I.6. Moulinet Dumas-Neyrpic type universel

I.6_1. Documentation

Voir notices M 2113/d et E 2113/K

I._6_2. Remargues_

- Moulinet à axe mobile, présenté sous deux versions : à transmission magnétique et générateur d'impulsions par vis sans fin et roue dentée (1 top pour 1, 2, 10, 20 ou 40 tours) réf. 2113 AA ou à interrupteur à lame souple (1 top - 1 tour) (réf. 2114 AA). Cette dernière version est,

à notre avis, la meilleure.

- L'axe a été modifié et renforcé par rapport au premier modèle qui a laissé de bien mauvais souvenirs à certains hydrologues.

- Le constructeur livre en accessoire un cercle protecteur d'hélice qui ne doit jamais être utilisé : les ennuis qu'il entraîne sont plus grands que les avantages qu'on peut attendre.

- Une seule hélice en matière plastique dont le montage est très simple par blocage sur l'axe.

- Le montage des fils de laison avec le compteur est relativement compliqué bien que le constructeur ait cherché à améliorer nettement les bornes étanches de branchement.

I.7. Moulinet NEYRFLUX

I.7_1. Documentation

Voir notices M 2142/b et E 2142/A

I.7_2. Remarques

- Moulinet à axe fixe avec paliers (sans roulement à billes) à très faible coefficient de frottement, tournant dans l'eau.

- Appareil très simple et très robuste dont les qualités hydrodynamiques sont réelles, en particulier vitesse de démarrage beaucoup plus faible que celle des moulinets usuels avec hélices en bronze.

- Possibilité de montage sur perche ou saumon.

II. LES COMPTEURS D'IMPULSIONS

II.1. Documentation

OTT HLf 120/7 I. 1064 et II 2066 et HWf 12400 01
NEYRPIC M 22.

II.2. Remarques

II.2.1. Couineurs

- Ces appareils sont de moins en moins utilisés. Il faut se rappeler que l'opérateur mesure le temps avec un chronomètre. Pour mesurer n impulsions, l'opérateur démarre le chronomètre à l'apparition d'un signal et compte zéro. Le chronomètre est arrêté après avoir compté n signaux. Le nombre de tours est égal à n fois 10, 20 ou 40 suivant le rapport de réduction choisi.

- Les réflexes des opérateurs sont généralement meilleurs avec les signaux sonores.

- En cas de défaillance, il est très facile de se dépanner avec une lampe de poche ordinaire : le moulinet est branché, en parallèle, aux bornes de l'interrupteur de la lampe.

II.2.2. Compteurs mécaniques

- Avec ces appareils, les opérateurs libérés du souci de compter des tops, peuvent s'attacher davantage aux données qualitatives des mesures.

- Les appareils semi-automatiques (F6 de OTT ou 2264 de NEYRPIC) éliminent dans une certaine mesure, les erreurs dues au manque de synchronisation entre le début de la mesure du temps et le début du comptage des impulsions.

- Avec les appareils à présélections : le comptage démarre sur le front d'une impulsion et s'arrête lorsque la valeur du facteur présélectionné est atteinte.

- Notons que les compteurs F10 et Z 51 de OTT ne sont pratiquement pas utilisés pour les mesures en rivière.

- Rappelons que les compteurs F6 et Z 41 comportent un relais pouvant être mis en ou hors circuit à l'aide d'un interrupteur interne. Ce relais permet de modifier la valeur de la résistance maximale admissible sur la ligne :

Z 41	15 ohms sans relais ;	200 ohms avec relais
F 6	15 ohms sans relais ;	40 ohms avec relais

et ce, dans le cas de mesures avec une grande longueur de câble électroporteur (stations téléphériques).

- Après usage, il est recommandé de stocker séparément les piles et les compteurs (décharge des piles et oxydations éventuelles).

- Pendant la mesure, éviter d'exposer tous ces compteurs directement à la pluie. L'humidité rentrant dans les mécanismes arrive, à la longue, à nuire au bon fonctionnement des compteurs à chiffres sauteurs.

- Veiller à manipuler sans brutalité le commutateur rotatif du F6 régler avec soin la tension du ressort de commande du chronomètre afin d'éviter des ruptures d'axes dans le chronomètre.

II.2.3. Compteurs électroniques

Les avantages essentiels des compteurs électroniques résident dans la possibilité de mesurer un grand nombre d'impulsions par seconde (jusqu'à 50 i/s) et leur présentation sous un très faible volume.

Les Etablissements FRON à Toulouse, après des essais sur différents prototypes, vont limiter leurs fabrications aux modèles CJR 22 pour jaugeage par point et par intégration avec moulinets à générateurs d'impulsions et CJR 30 pour jaugeage point par point avec moulinet à génératrice de courant.

Ne pas oublier, avec les compteurs CJR 22 et CJR 30 de retirer les piles de leur logement entre chaque campagne de mesure.

III. LES PERCHES

III.1. Documentation

Voir notices OTT HLf 120/8, HBf 1005005 et notices NEYRPIC M 23.24/a.

III.2. Remarques

Dans le cas du jaugeage à gué, utiliser de préférence une perche avec coulisse. La perche, fabriquée par Neyrpic, comporte sur la coulisse, un vernier pour lectures au centimètre. La Société OTT n'a pas prévu de vernier sur la coulisse HERES. La figure 4 donne les plans d'un vernier que nous avons mis au point et qui s'adapte à la coulisse HERES. Les Etablissements OTT, peuvent, à la demande, graduer la perche JANA comme indiqué sur la figure 4 de façon à faire des lectures directes.

- Ne pas oublier d'utiliser les perches avec une plaque de base adaptée à la nature du fond : plus le lit est mobile, plus la surface de la plaque de base doit être grande pour éviter l'enfoncement de la perche.

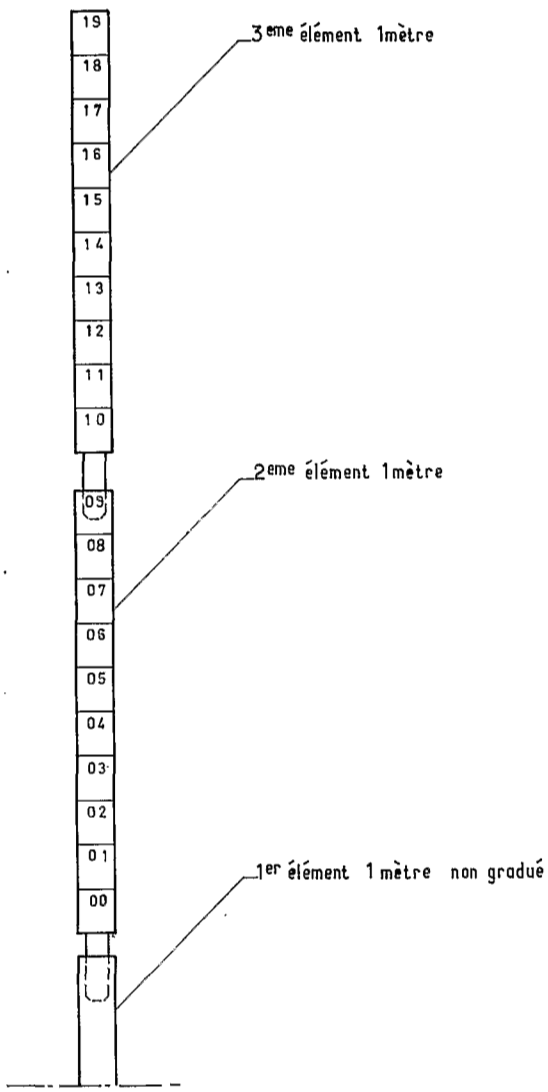
- Supprimer la pointe de la perche OTT sur fond rocheux ou radier de béton.

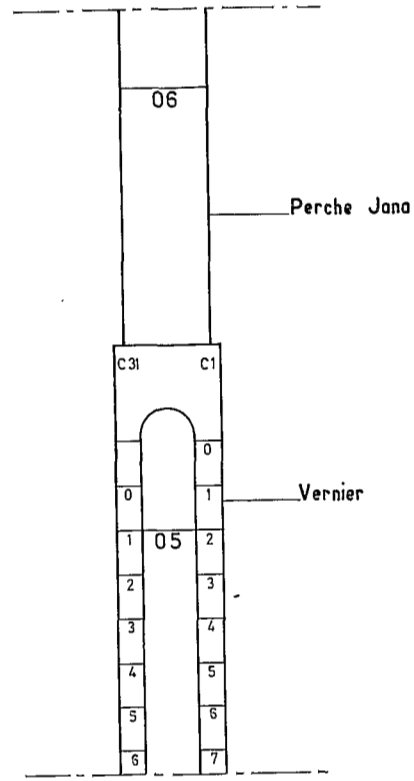
III.3. Note au sujet de la perche AGAR III

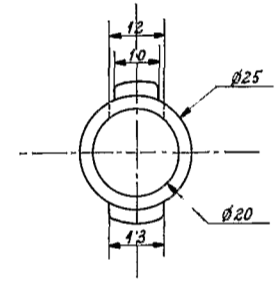
Actuellement, la fabrication de la perche AGAR III est arrêtée. Elle est remplacée par la perche à Intégration et à Régulation Electronique "PIREE" qui sera commercialisée début 1978. Cet appareil tient compte des enseignements fournis par 10 ans d'utilisation de la perche AGAR III. L'accent a été mis sur la fiabilité et la facilité d'utilisation grace, notamment à son chrono-compteur électronique incorporé.

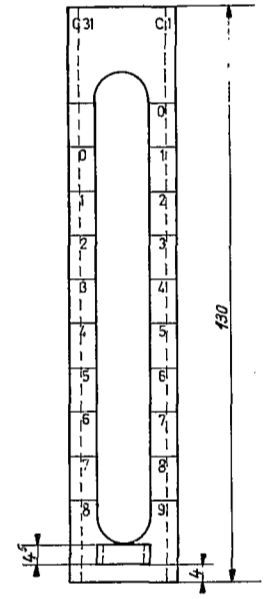
Fig. 4

Graduation de la perche Jana (croquis)









Position	moulinet
C1	052
C31	051

_Perche Jana graduée pour utilisation avec coulisse Héres et vernier pour lecture directe des profondeurs en cm.

O.R.S.T.O.M. DIV_ 261 660

IV. LES TREUILS ET LES CABLES

IV.1. Documentation

Voir notices OTT HLf 120/17, HLf 120/18 et notices Neyrpic M 23.24/a.

IV.2. Remarques sur les treuils

- OTT ne fabrique plus le treuil VOLGA de 100 kg (version mécanique et électrique). L'ancien treuil GRAN de 75 kg dans sa version actuelle, peut supporter des charges de 100 kg.
- Il est regrettable que Neyrpic ne prévoit pas pour son treuil léger un ralentisseur pour jaugeages par intégration.
- Le treuil de 25 kg de OTT ne peut recevoir qu'une seule couche de câble sur le touret. La mesure de la profondeur est erronée lorsqu'il y a plusieurs couches.
- Les treuils, bien que le plus souvent très robustes, doivent être manipulés avec soin et entretenus correctement (graissage régulier aux paliers, réglage du frein, propreté des balais et collecteurs, graissage du mécanisme des compteurs qui ne sont pas étanches à l'eau).

IV.3. Remarques sur les câbles

- La résistance à la rupture des câbles électroporteurs à un conducteur est de l'ordre de 6000 newtons, ce qui est largement suffisant pour les mesures avec des saumons de 100 kg.
- Des essais ont été faits à la Circonscription Electrique du Sud-Ouest à Toulouse, en vue de détecter les signaux du moulinet (parasites radio émis par un vibreur placé dans le saumon et actionné par les contacts du moulinet), à l'aide d'un récepteur radio.

La suspension du saumon est réalisée avec un câble ordinaire de 2 mm de diamètre. Ce système quoique très séduisant à première vue, n'a pas été généralisé ; il n'est d'ailleur utilisable qu'avec les moulinets donnant 1 contact tous les 10 ou 20 tours d'hélice. Dans ce domaine, l'imagination des hydrométristes peut se donner libre cours et les idées n'ont pas manqué, mais le câble électroporteur est toujours utilisé.

- Le câble D2 de OTT constitué par un conducteur en cuivre guipé avec âme isolée en acier recouvert d'une tresse en nylon, d'un diamètre de 4,2 mm est relativement fragile. Il est préférable de le remplacer sur les treuils de 25 kg par du câble électroporteur en acier type D5.

Notons que la Société OTT fabrique des fiches permettant un raccord aisé du câble au moulinet et au saumon. Le détail de ces bornes et de leur montage est donné sur les photos de la figure 5.

V. LES CYCLOPOTENCES

V.1. Documentation

Il semble, d'après la documentation que nous possédons, que la firme OTT ne fabrique pas de cyclopotences. Les appareils de ce type disponibles en France, sont fabriqués par Neyrpic et la Société Mécabolier (voir notice M 23.24/a de Neyrpic et notice Mécabolier relative à la cyclopotence électrifiée type D.T.G.-E.D.F.).

V.2. Remarques

- Ce matériel, lorsqu'il existe des ponts suffisamment larges perpendiculaires à l'axe de la rivière, permet la réalisation de jaugeages, même par très fortes vitesses.

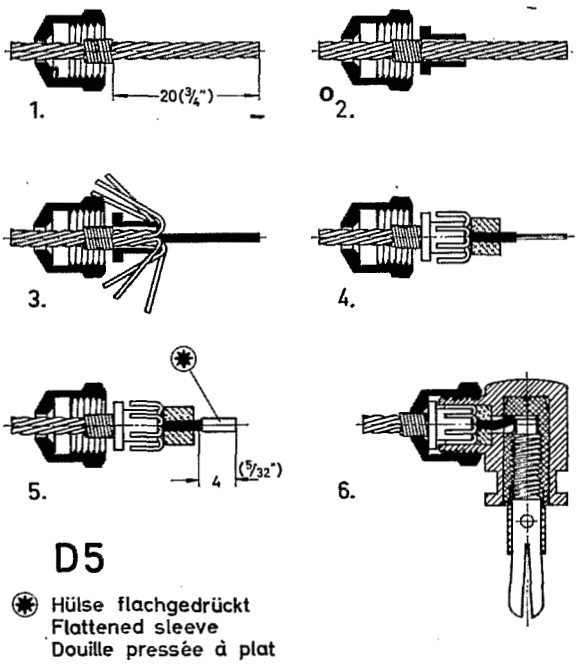
- Un inconvénient de la cyclopotence E.D.F.-D.T.G. est le bruit émis par le moteur : il peut être diminué en utilisant un câble de connexion assez long.

- Un système relativement facile à réaliser est le porte-à-faux sur véhicule. On peut évidemment utiliser n'importe quel véhicule. Nous donnons sur la figure 6 un exemple d'équipement sur fourgon Peugeot J7 de 1800 kg.

Fig- 5

Montage d'une borne coudée OTT avec du câble D5

Câble gaine métallique + un conducteur



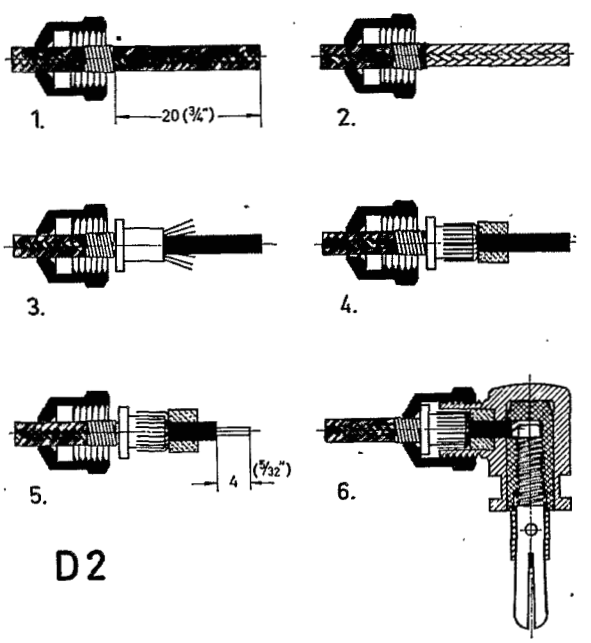
D5

✱ Hülse flachgedrückt
Flattened sleeve
Douille pressée à plat

Montage d'une borne coudée OTT avec du câble D2

Câble à gaine tressée fibre + tresse métallique + conducteur

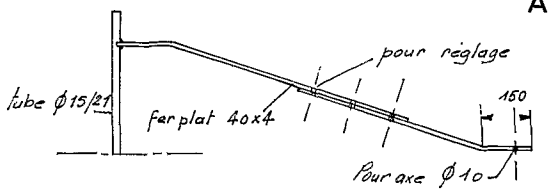
Câble utilisé sur le treuil NEVA OTT



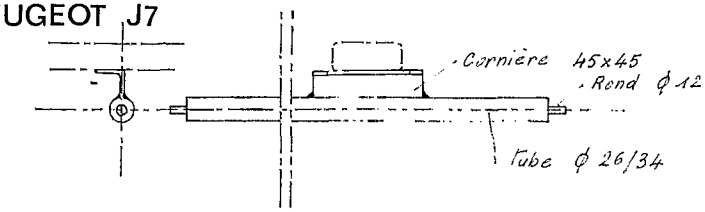
D2

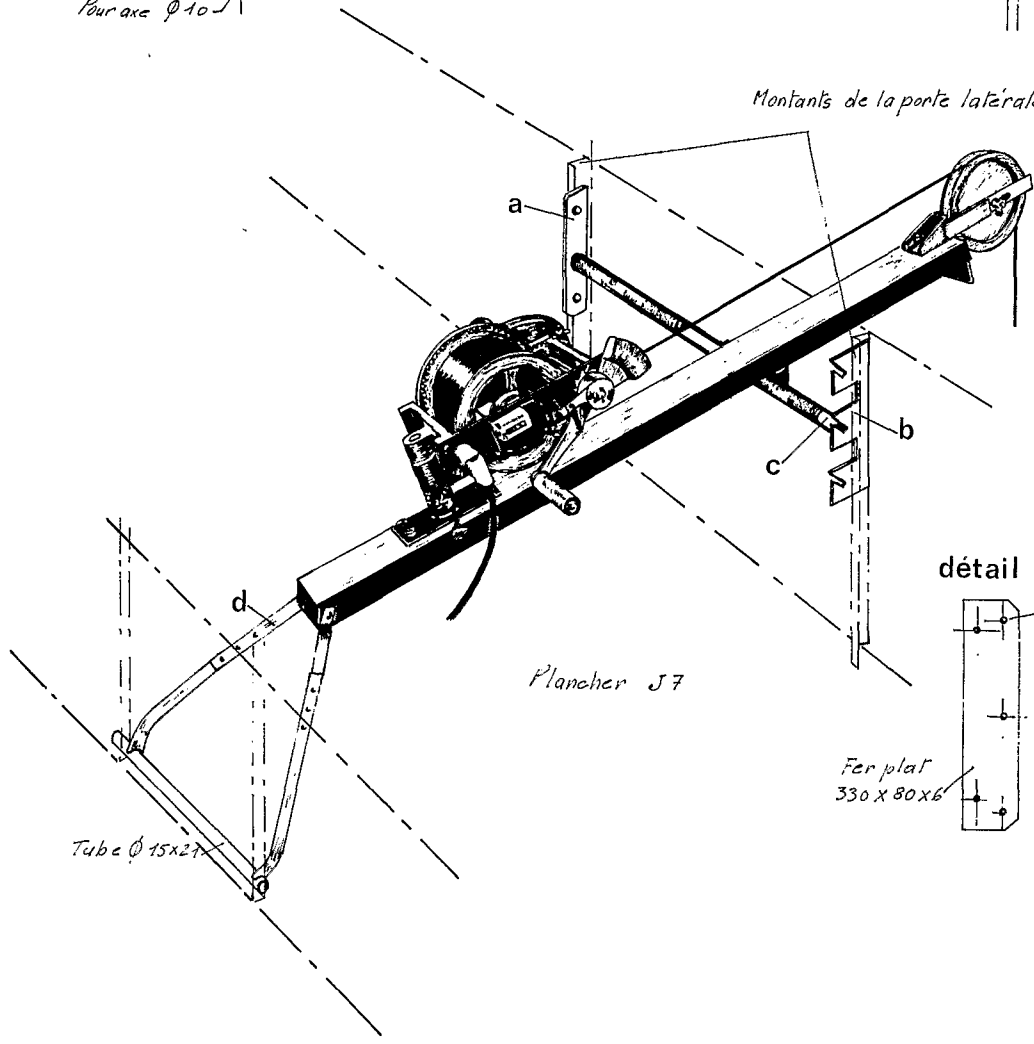
MONTAGE D'UN PORTE A FAUX Fig_6
AVEC TREUIL NEWA SUR PEUGEOT J7

détail d

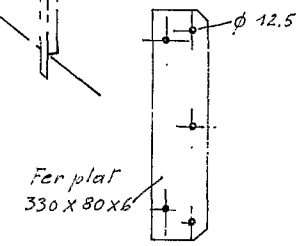


détail c

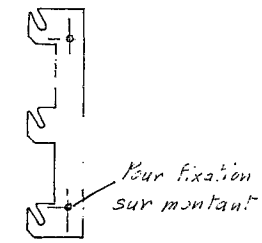




détail a



détail b



VI. MONTAGES SUR BATEAU

Nous décrirons ci-dessous le montage que nous avons mis au point et qui nous semble parfaitement adapté aux mesures de contrôle des stations d'un réseau (1).

Le saumon utilisé, d'une masse maximale de 25 kg, est manoeuvré par un treuil simple (Newa ou autre) fixé sur une potence en travers du bateau. Le saumon plonge dans l'eau à babord à 50 cm environ à l'extérieur du boudin (voir figure 7). Un opérateur, assis sur le boudin tribord, peut manoeuvrer le treuil et aussi, en cas de besoin, le moteur hors-bord qui doit toujours rester fixé au tableau arrière pendant les opérations de jaugeage.

La figure 9 donne les détails de la potence. Dans le cas de rivières étroites, pour réaliser les dernières verticales près de la berge, la potence peut être retournée pour plonger le saumon à tribord (voir note technique N° 36 déjà citée).

La fixation du bateau au câble définissant la section, est réalisée à l'aide d'un chariot largable muni d'un compteur pour la mesure de la largeur et le repérage des abscisses. La figure 8 montre ce chariot. En cas de danger (corps flottants) l'opérateur assis, sur le boudin tribord, vers l'avant du bateau, peut à l'aide du levier de déclenchement, séparer le chariot de translation du dispositif de fixation au canot. Le bateau dérive alors à la vitesse du courant, le chariot restant fixé au câble. Le danger ayant disparu, on vient se fixer au chariot à l'aide du moteur.

Les avantages de ce montage sont les suivants :

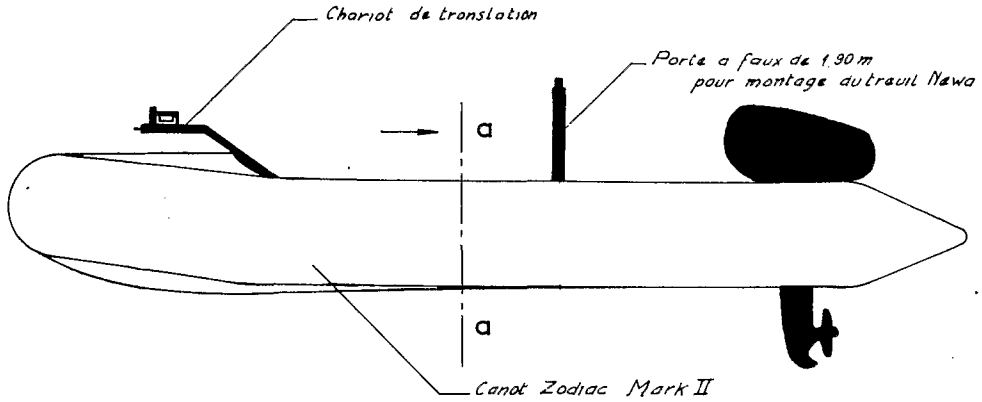
- grande stabilité du bateau grâce à un équilibrage parfait de l'ensemble,

- possibilité de jauger des rivières jusqu'à 300 m de large avec des vitesses voisines de 3 m/s,

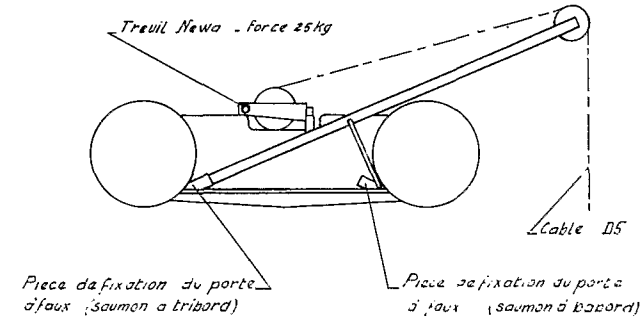
---

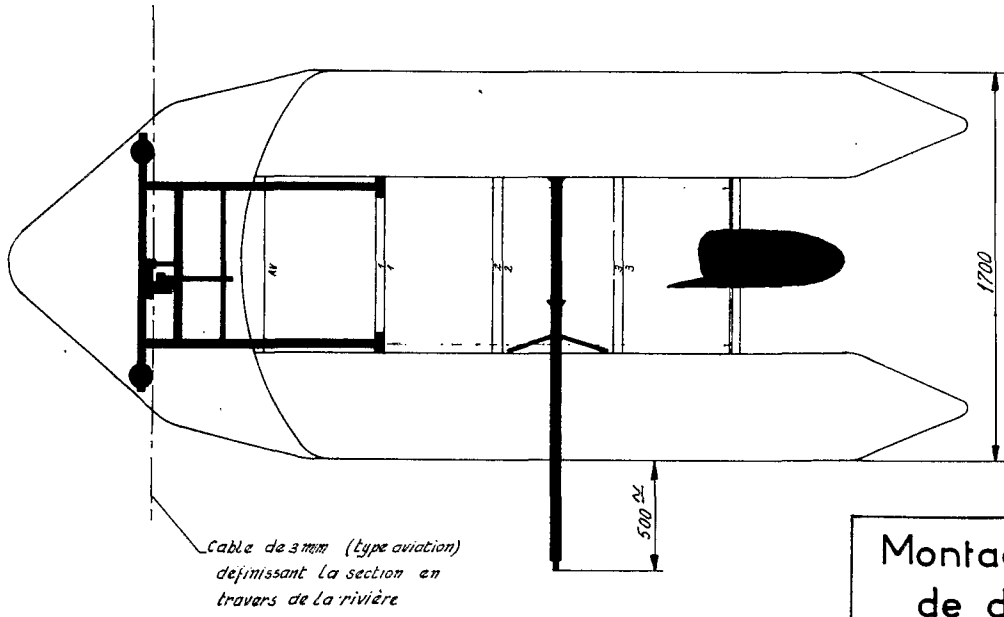
(1) voir également : Quelques améliorations apportées à la Technique des jaugeages en rivière par M. ALDEGHERI ORSTOM Note Technique N° 36.

Fig_7



Coupe a


Treuil Newa - force 25 kg
Cable Ø5
Piece de fixation du porte
a faux (saumon a tribord)
Piece de fixation du porte
a faux (saumon a bbord)

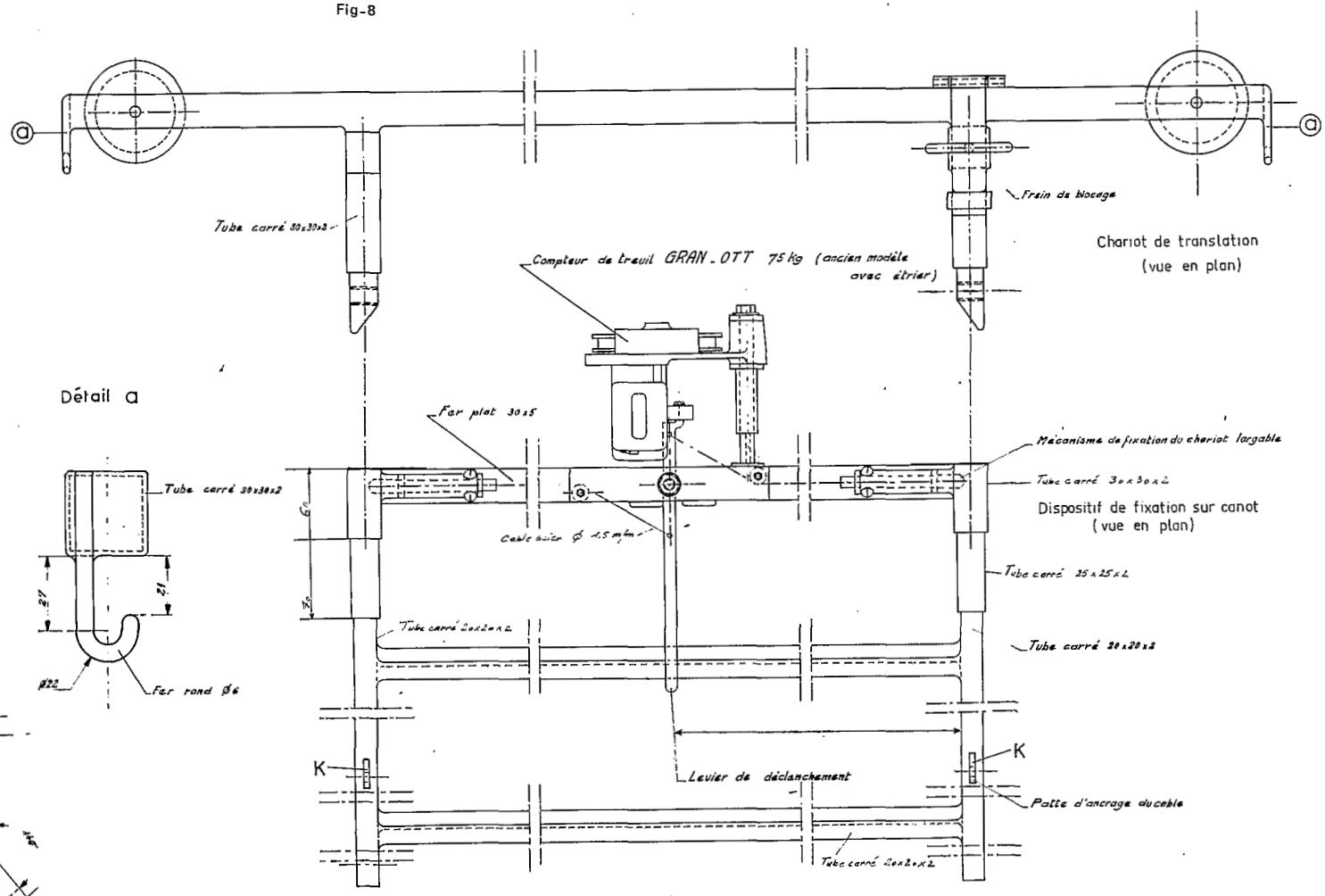


Montage de l'ensemble chariot de déplacement porte à faux sur canot Zodiac Mark II

Ech: 1cm - 0,200m

O.R.S.T.O.M. DIV_261 659

Fig-8

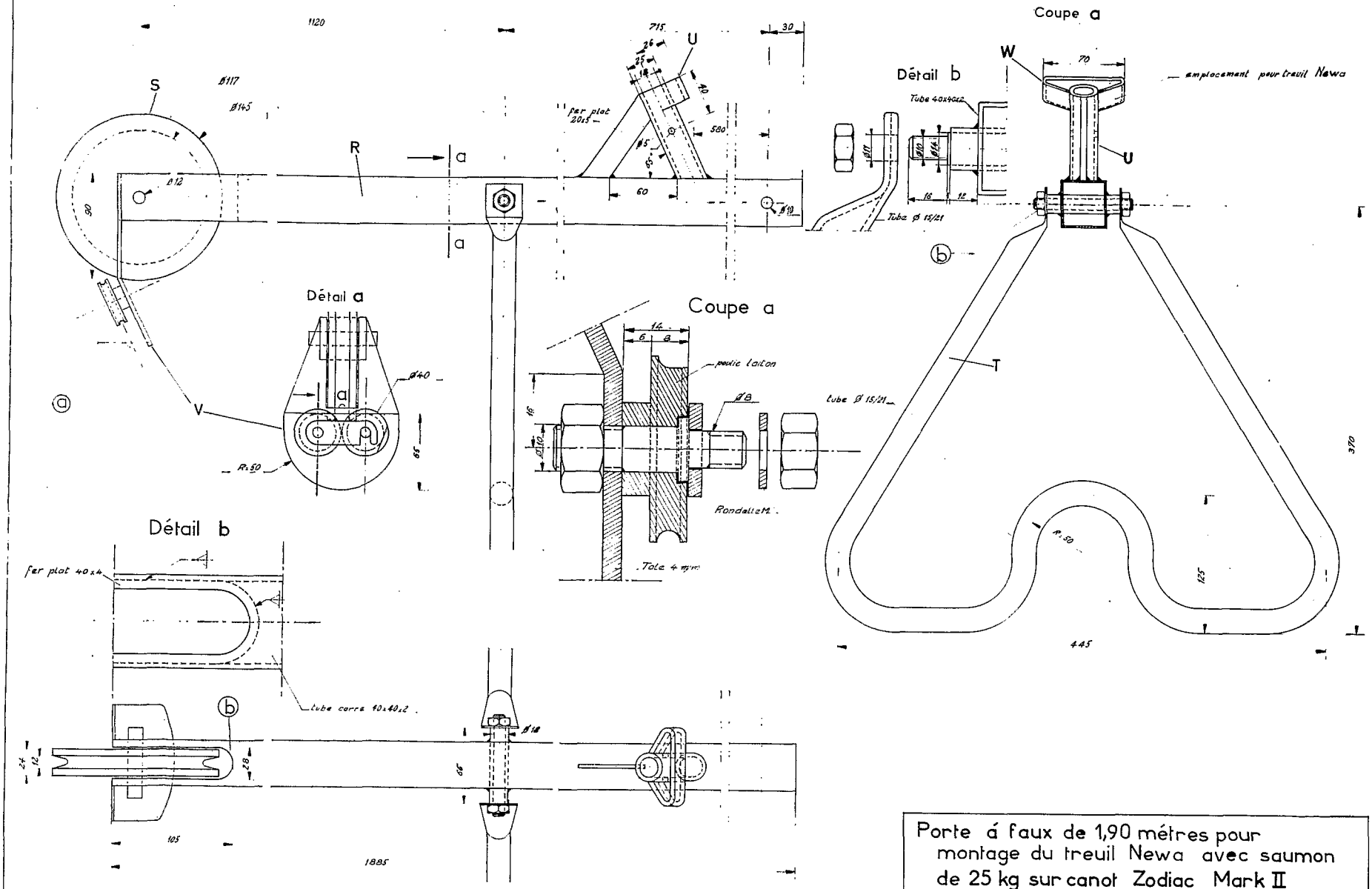


ORSTOM. DIV. 261 652

Chariot de translation pour jaugeage en bateau

Ech : 1cm = 0,010m
Ech : 1cm = 0,025m

Fig.9



Porte á faux de 1,90 métres pour montage du treuil Newa avec saumon de 25 kg sur canot Zodiac Mark II

ORSTOM DIV.261 657

- personnel réduit : 2 opérateurs sur le bateau arrivent à mener à bien une mesure de débit dans les limites indiquées ci-dessus,

- matériel léger et peu encombrant,

- angle de dérive du câble donné par un rapporteur fixé sur la poulie,

- poulies de guidage empêchant le câble de sauter de la poulie de renvoi par fortes vitesses.

Il nous semble utile d'insister sur les points suivants. Avec une embarcation pneumatique, il est dangereux et donc déconseillé :

- de placer le saumon à l'avant du bateau car il y a déséquilibre important et risque de rentrée d'eau, par l'avant, même pour des vitesses relativement faibles,

- de fixer le canot à un câble en travers sans moteur à l'arrière. En effet, dans ces conditions, si un opérateur se trouvant seul sur le bateau, se porte vers l'avant, il y a risque de chavirement. Le canot pneumatique peut, sous l'action du courant, tourner autour du câble (déjà vu en France avec des vitesses de l'ordre de 1 m.s).

- de fixer le bateau à un câble de façon rigide.

Des embarcations pneumatiques modernes, avec les aménagements que nous avons décrits, sont parfaitement adaptées à la mesure des débits en rivière et les hydrométristes n'ont, à notre avis, pas besoin de se compliquer la tâche avec des canots métalliques, plastiques ou autres "montages en portière". Les performances de ce matériel (stabilité, flottabilité, tirant d'eau, ...) ne sont pas comparables et de loin, à celles des canots pneumatiques.

La Société OTT (voir notice HBf 10 050/05 page 9) fabrique un radeau pneumatique qui, à première vue, paraît séduisant mais qui, en réalité, l'est beaucoup moins. En effet, l'absence de fond rend ce radeau pratiquement inutilisable dès que la vitesse atteint environ 1,50 m/s.

Il faut toujours se rappeler que le matériel dont nous venons de parler constitue un équipement léger et qu'il ne doit pas être utilisé en toutes circonstances : au-dessus de 3 m/s il faut trouver autre chose...

VII. LES TÉLÉPHÉRIQUES : CALCULS DES FLÈCHES ET DES TENSIONS

VII.1. Documentation

Voir notices M 244 de Neyrpic et HLf 120/13 de OTT ainsi que le cahier de l'ORSTOM série Hydrologie sur "les Stations téléphériques de jaugeage, description, notes de calculs et règles à observer pour leur installation et leur utilisation", d'où nous tirons les tableaux ci-dessous.

VII.2. Stations avec ancrages fixes sur les deux berges (cas classique)

Le tableau I donne pour quelques câbles usuels dont les caractéristiques sont indiquées sur la figure 10, les flèches maximales en charge lorsque la tension est égale au 1/3 de la résistance à la rupture pour une charge concentrée de 5000 N et différentes valeurs de la portée.

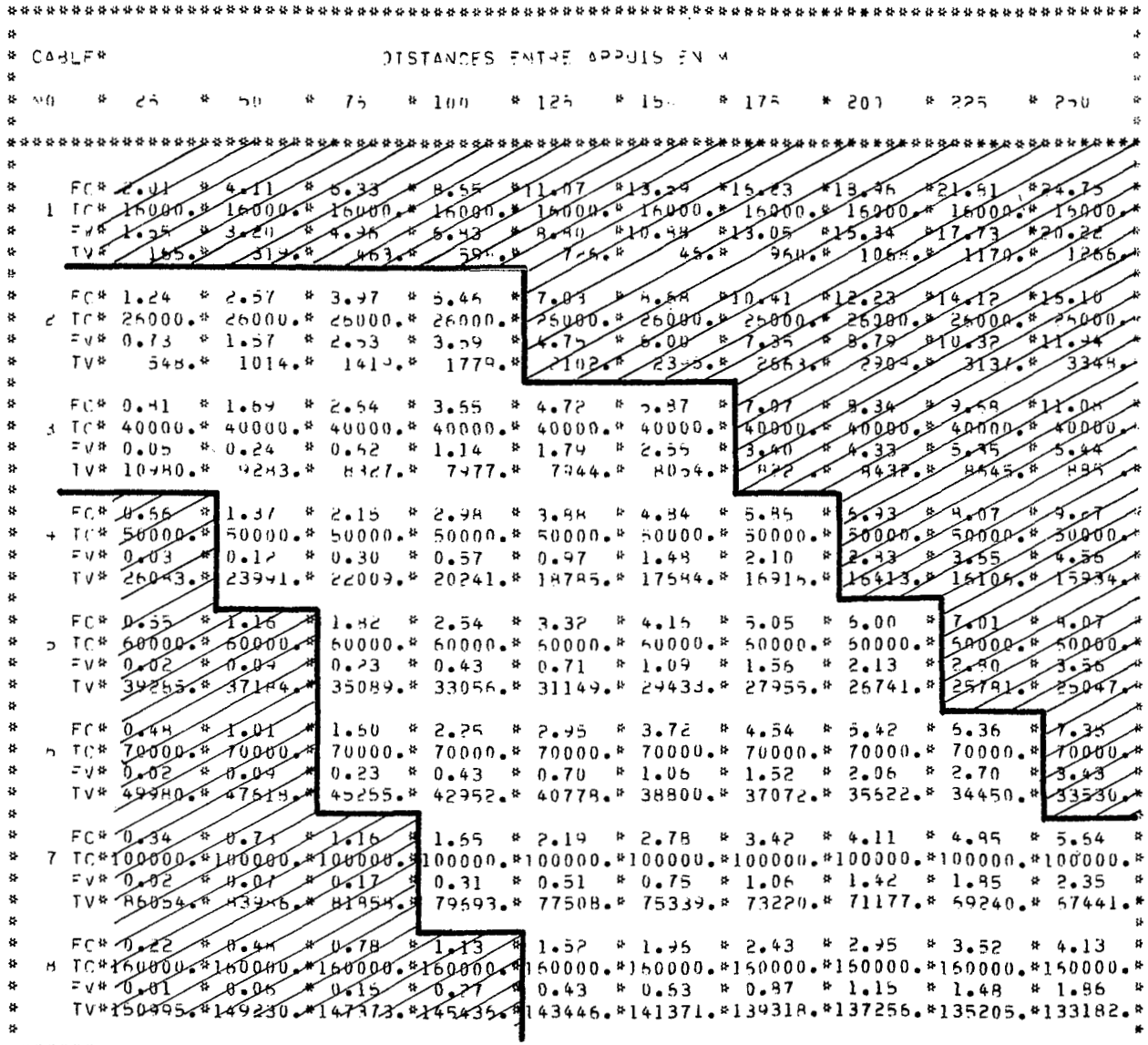
Le tableau II donne pour ces mêms cables et pour différentes portées, les valeurs des flèches et tensions en charge ainsi que des flèches et tensions à vide. De ce tableau nous avons tiré l'abaque représenté par la figure 10.

A l'aide de ces renseignements, connaissant la flèche maximale à ne pas dépasser en charge en fonction des caractéristiques de la section (niveau des appuis, plus hautes eaux...) on choisit le câble qui convient le mieux. Le tableau II donne en fonction de la tension maximale en charge, la valeur de la flèche F_v à donner au câble à vide au moment de l'installation.

CABLE N°	FLECHE EN CHARGE EN M POUR TC=R/3 ET LES DISTANCES ENTRE APPUIS EN M									
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
1	2.01	4.11	6.33	8.65	11.07	13.59	16.23	18.96	21.81	24.75
2	1.24	2.57	3.97	5.46	7.03	8.68	10.41	12.23	14.13	16.10
3	0.81	1.69	2.64	3.65	4.72	5.87	7.07	8.34	9.68	11.08
4	0.66	1.37	2.15	2.98	3.88	4.84	5.85	6.93	8.07	9.27
5	0.55	1.16	1.82	2.54	3.32	4.16	5.05	6.00	7.01	8.07
6	0.48	1.01	1.60	2.25	2.95	3.72	4.54	5.42	6.36	7.35
7	0.34	0.73	1.16	1.65	2.19	2.78	3.42	4.11	4.85	5.64
8	0.22	0.48	0.78	1.13	1.52	1.96	2.43	2.95	3.52	4.13

Tableau I

Charge concentrée = 5000 N.



CABLE	DISTANCES ENTRE APPUIS EN M									
N°	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
1	FC*	2.41	4.11	6.33	8.55	11.07	13.29	15.23	18.96	21.51	24.75
	TC*	16000.*	16000.*	16000.*	16000.*	16000.*	16000.*	16000.*	16000.*	16000.*	16000.*
	FV*	1.25	3.20	4.96	6.43	8.80	10.98	13.05	15.34	17.73	20.22
	TV*	165.*	317.*	463.*	594.*	726.*	45.*	960.*	1068.*	1170.*	1266.*
2	FC*	1.24	2.57	3.97	5.46	7.03	8.68	10.41	12.23	14.12	15.10
	TC*	26000.*	26000.*	26000.*	26000.*	26000.*	26000.*	26000.*	26000.*	26000.*	26000.*
	FV*	0.73	1.57	2.53	3.59	4.75	6.00	7.35	8.79	10.32	11.94
	TV*	548.*	1014.*	1419.*	1779.*	2102.*	2395.*	2663.*	2904.*	3137.*	3348.*
3	FC*	0.41	1.69	2.54	3.55	4.72	5.87	7.07	8.34	9.58	11.04
	TC*	40000.*	40000.*	40000.*	40000.*	40000.*	40000.*	40000.*	40000.*	40000.*	40000.*
	FV*	0.05	0.24	0.52	1.14	1.79	2.55	3.40	4.33	5.35	5.44
	TV*	10980.*	9283.*	8327.*	7477.*	7944.*	8054.*	822.*	9432.*	8445.*	895.*
4	FC*	0.56	1.37	2.15	2.98	3.88	4.84	5.85	6.93	8.07	9.27
	TC*	50000.*	50000.*	50000.*	50000.*	50000.*	50000.*	50000.*	50000.*	50000.*	50000.*
	FV*	0.03	0.12	0.30	0.57	0.97	1.48	2.10	2.83	3.55	4.36
	TV*	26043.*	23941.*	22009.*	20241.*	18785.*	17584.*	16915.*	16413.*	16106.*	15934.*
5	FC*	0.55	1.16	1.82	2.54	3.32	4.15	5.05	6.00	7.01	8.07
	TC*	60000.*	60000.*	60000.*	60000.*	60000.*	60000.*	60000.*	60000.*	60000.*	60000.*
	FV*	0.02	0.09	0.23	0.43	0.71	1.09	1.56	2.13	2.80	3.56
	TV*	39265.*	37144.*	35089.*	33056.*	31149.*	29433.*	27955.*	26741.*	25781.*	25047.*
6	FC*	0.48	1.01	1.60	2.25	2.95	3.72	4.54	5.42	6.36	7.35
	TC*	70000.*	70000.*	70000.*	70000.*	70000.*	70000.*	70000.*	70000.*	70000.*	70000.*
	FV*	0.02	0.09	0.23	0.43	0.70	1.06	1.52	2.06	2.70	3.43
	TV*	49980.*	47618.*	45255.*	42952.*	40778.*	38800.*	37072.*	35522.*	34450.*	33530.*
7	FC*	0.34	0.71	1.16	1.65	2.19	2.78	3.42	4.11	4.95	5.64
	TC*	100000.*	100000.*	100000.*	100000.*	100000.*	100000.*	100000.*	100000.*	100000.*	100000.*
	FV*	0.02	0.07	0.17	0.31	0.51	0.75	1.06	1.42	1.95	2.35
	TV*	86054.*	83946.*	81954.*	79593.*	77508.*	75339.*	73220.*	71177.*	69240.*	67441.*
8	FC*	0.22	0.48	0.78	1.13	1.52	1.96	2.43	2.95	3.52	4.13
	TC*	160000.*	160000.*	160000.*	160000.*	160000.*	160000.*	160000.*	160000.*	160000.*	160000.*
	FV*	0.01	0.06	0.15	0.27	0.43	0.63	0.87	1.15	1.48	1.86
	TV*	150995.*	149230.*	147373.*	145435.*	143446.*	141371.*	139318.*	137256.*	135205.*	133182.*

Tableau II

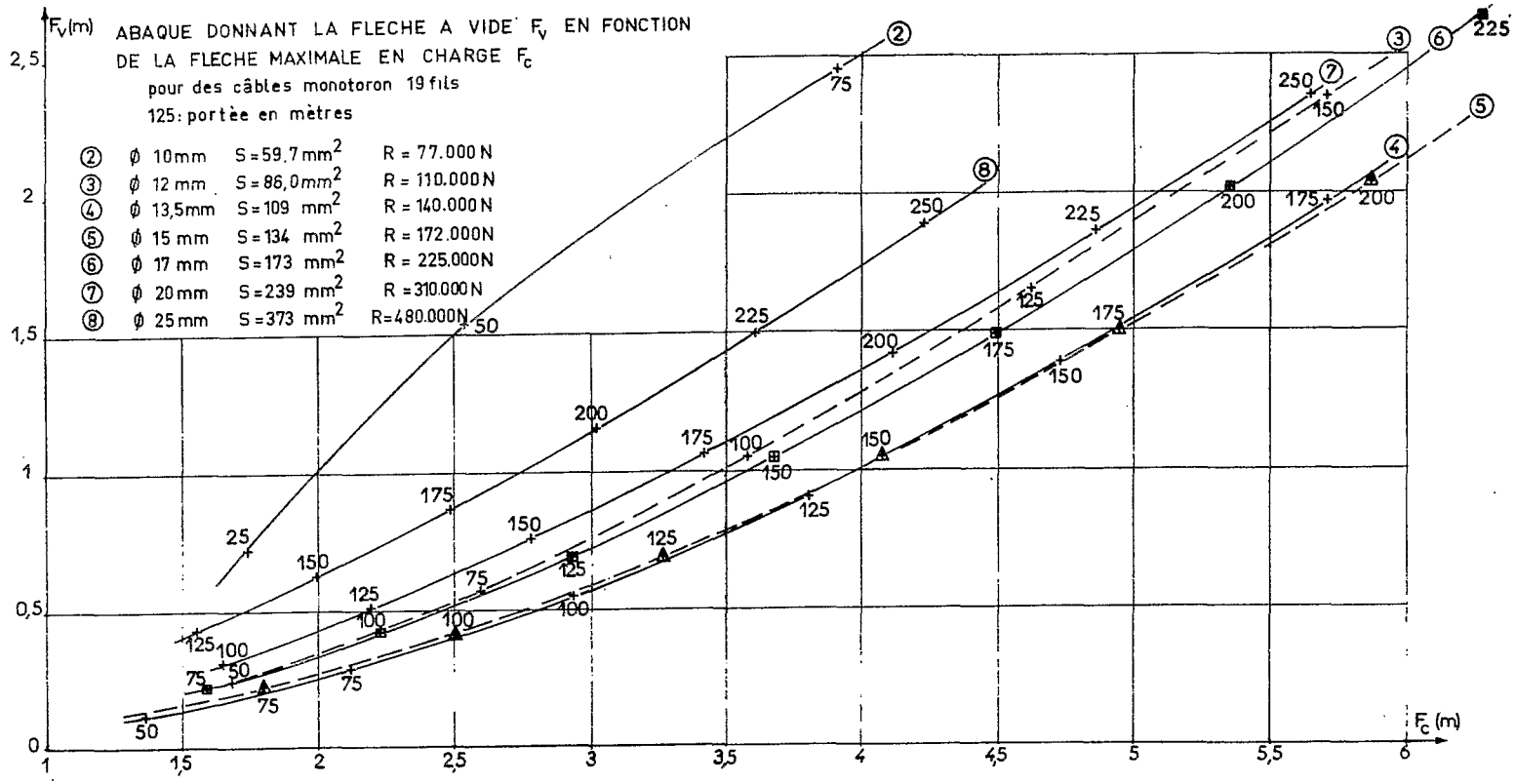

F_V(m)
ABAQUE DONNANT LA FLECHE A VIDE F_V EN FONCTION
DE LA FLECHE MAXIMALE EN CHARGE F_C
pour des câbles monotoron 19 fils
125: portée en mètres
② ϕ 10mm S=59,7mm² R = 77.000 N
③ ϕ 12 mm S=86,0mm² R = 110.000 N
④ ϕ 13,5mm S=109 mm² R = 140.000 N
⑤ ϕ 15 mm S=134 mm² R = 172.000N
⑥ ϕ 17 mm S=173 mm² R = 225.000N
⑦ ϕ 20mm S=239 mm² R =310.000 N
⑧ ϕ 25mm S=373 mm² R=480.000N
F_C (m)

Fig-10

Exemple

La section choisie permet de définir les caractéristiques suivantes :

- flèche maximale en charge : 4,15 m
- portée entre appuis : 1,50 m

Le tableau I montre que le câble N° 5 convient le mieux:tendu avec une flèche de 4,16 m il est soumis à une tension de 60 000 N.

Pour qu'il en soit ainsi dans les conditions les plus défavorables de fonctionnement, il faudra tendre ce câble à vide, en laissant une flèche F_v égale à 1,09 m, ce qui correspond à une tension à vide de 29 433 N.

VII.3.Stations avec ancrage mobile(bloc de béton de masse = R/3 (R résistance à la rupture) accroché au câble tracteur par l'intermédiaire d'une poulie placée au sommet du pylône d'appui).

La figure 11 montre le principe de ce montage. Le câble porteur est toujours soumis à une tension constante égale à R/3. La flèche sera minimale à vide et maximale en charge, cette variation ne sera pas due à un changement de la tension du câble, mais à un déplacement vers le haut du bloc de béton. Les installations seront réalisées pour qu'il existe une course suffisante.

Les calculs ont été réalisés en prenant une charge concentrée de 7 000 N légèrement supérieure à la charge de rupture du câble électroporteur.

Le tableau III donne la valeur de la flèche en charge sous une tension égale à R/3 pour différents câbles et diverses valeurs de la portée. Ce tableau permet de choisir les câbles en fonction des caractéristiques de la section (valeur de la flèche maximale en charge). On en déduit la masse du bloc de béton, d'où son volume en admettant une densité du béton de 2,2 tonnes/m3.

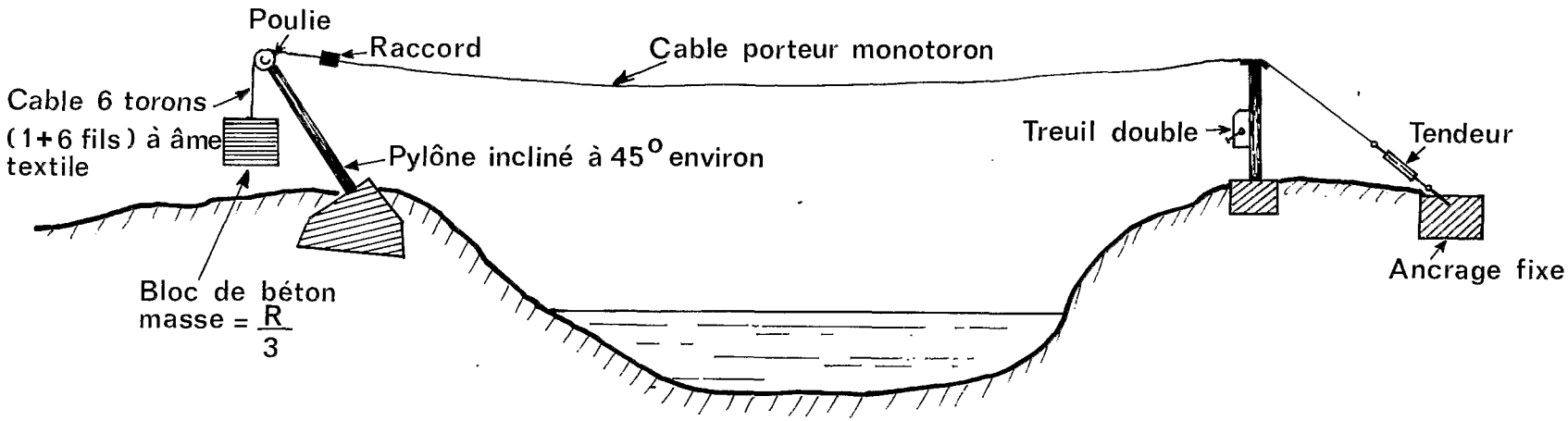

Poulie
Raccord
Cable porteur monotoron
Cable 6 torons
(1+6 fils) à âme
textile
Pylône incliné à 45° environ
Treuil double
Tendeur
Bloc de béton
masse = R/3
Ancrage fixe

Fig-11

CABLE N°	FLECHE EN CHARGE EN M POUR TC=R/3 ET LES DISTANCES ENTRE APPUIS EN M									
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
1	2.79	5.68	8.68	11.78	14.99	18.31	21.73	25.26	28.89	32.63
2	1.72	3.53	5.42	7.39	9.44	11.57	13.79	16.09	18.47	20.93
3	1.13	2.32	3.58	4.90	6.29	7.74	9.26	10.85	12.50	14.21
4	0.91	1.87	2.90	3.98	5.13	6.34	7.60	8.93	10.32	11.77
5	0.76	1.57	2.44	3.37	4.36	5.41	6.51	7.67	8.88	10.16
6	0.65	1.36	2.14	2.96	3.85	4.79	5.79	6.85	7.97	9.14
7	0.46	0.98	1.54	2.15	2.82	3.53	4.30	5.11	5.98	5.90
8	0.29	0.63	1.02	1.44	1.91	2.42	2.98	3.59	4.22	4.91

Tableau III

Charge concentrée = 7000 N.

Le tableau IV donne les valeurs de la flèche à vide pour une tension égale à R/3 que l'on peut comparer à celle obtenue après montage de l'installation.

VII.4.Remarques

- Avec les transporteurs aériens, il est théoriquement possible de mesurer des vitesses de l'ordre de 6 à 7 m/s. Il faut que les équipes soient bien entraînées et qu'il n'y ait pas trop de transports en surface (branches, herbes).

- Un jaugeage à partir d'une station téléphérique est long, les déplacements du moulinet sont lents : il faut compter 20 à 30 minutes pour traverser 250 m avec un treuil double de 100 kg manuel.

- Le matériel doit toujours être en parfait état : treuils et câbles graissés périodiquement (ne pas oublier la poulie de renvoi qui risque de se gripper très rapidement). Veiller au bon fonctionnement du contact de fond car c'est de lui que dépend l'ensablement du moulinet dans les rivières à fond sableaux.

- Au moins une fois par an, contrôler la flèche du câble porteur et régler la tension des câbles tracteurs dès que leur flèche augmente.

- Maintenir la section de mesure propre par des débroussaillages périodiques. Elaguer les arbres dont la chute pourrait endommager les câbles.

- Lors de l'enroulement du câble électroporteur, réaliser cette opération soigneusement à spires jointives et éviter de laisser le saumon pendu au câble pendant une longue période.

CABLE NO	FLECHE A VIDE EN M POUR TV=R/3 ET LES DISTANCES ENTRE APPUIS EN M									
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
1	0.15	0.62	1.39	2.48	3.87	5.58	7.60	9.94	12.59	15.56
2	0.09	0.38	0.86	1.52	2.38	3.43	4.67	6.10	7.73	9.54
3	0.06	0.25	0.56	0.99	1.55	2.23	3.03	3.96	5.02	6.19
4	0.05	0.20	0.45	0.79	1.24	1.78	2.43	3.17	4.01	4.95
5	0.04	0.16	0.37	0.66	1.03	1.49	2.02	2.64	3.34	4.13
6	0.03	0.14	0.32	0.56	0.88	1.27	1.73	2.26	2.87	3.54
7	0.02	0.10	0.22	0.39	0.62	0.89	1.21	1.59	2.00	2.48
8	0.01	0.06	0.13	0.25	0.39	0.55	0.76	0.99	1.25	1.55

Tableau IV

VIII. TRAVAUX DE BUREAU

VIII.1.Calcul cote moyenne

Nous donnons ci-après un exemple de calcul de cote moyenne pour un jaugeage fictif sur 4 verticales au cours d'une crue à l'aide de la formule :

$$H_{moy} = \frac{\sum_{o}^{n} (H_i \, P_{ui})}{\sum_{o}^{n} P_{ui}}$$

Verticales	Cotes	PU1	PU2	PU3
1	200 cm	1 m2/s	1 m2/s	5 m2/s
2	250 cm	2 m2/s	1 m2/s	2 m2/s
3	300 cm	5 m2/s	2 m2/s	1 m2/s
4	250 cm	1 m2/s	5 m2/s	1 m2/s

$$H_{moy}(1) = \frac{(200 \times 1) + (250 \times 2) + (300 \times 5) + (250 \times 1)}{1 + 2 + 5 + 1} = \frac{2450}{9} = 272 \text{ cm}$$

$$H_{moy}(2) = \frac{(200 \times 1) + (250 \times 1) + (300 \times 2) + (250 \times 5)}{9} = \frac{2300}{9} = 256 \text{ cm}$$

$$H_{moy}(3) = \frac{(200 \times 5) + (250 \times 2) + (300 \times 1) + (250 \times 1)}{9} = \frac{2050}{9} = 228 \text{ cm}$$

Pour un même débit (PU identiques) et des variations de cotes identiques au cours du jaugeage la cote à attribuer au jaugeage varie de H = 228 cm à H = 272 cm selon la répartitions des PU.

Cas N° 3

L'essentiel du débit passe entre les cotes 200 et 250. Cote du jaugeage = 228.

Cas N° 1

L'essentiel du débit est mesuré près de la cote maximale (250 à 300). Cote du jaugeage = 272 cm.

VIII.2. Consignes relatives au planimétrage

- Planimétrer sur une surface plane et horizontale,
- Placer le dessin à planimétrer sous une feuille de calque de façon que la roulette du planimètre se déplace toujours sur cette feuille.
- Placer le pôle du planimètre de façon qu'au départ et donc à l'arrivée, les deux bras de l'appareil soient perpendiculaires.
- Ne jamais remettre le compteur à zéro mais faire une lecture au départ et une lectrue à l'arrivée.
- Suivre le contour de la surface à planimétrer assez rapidement et sans trembler.
- Effectuer toujours deux planimétrages successifs en déplaçant le pôle du planimètre entre les deux mesures. Si les résultats présentent entre eux des écarts de plus de 2 % recommencer l'opération et prendre la moyenne de deux planimétrages présentant des écarts inférieurs à 2 %.

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Direction générale :
24, rue Bayard - 75008 PARIS

Service des Publications :
70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY

O.R.S.T.O.M. Éditeur
Dépôt légal : 2è trim. 1979
I.S.B.N. : 2-7099-0546-9